ЭЛЕКТРИЧЕСТВО



1948

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

7

КОММУНИЗМ ЕСТЬ СОВЕТСКАЯ ВЛАСТЬ
ПЛЮС ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ВСЕЙ СТРАНЫ (Ленин)

ЖУРНАЛ ОСНОВАН в 1880 г.

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

7
1948
ИЮЛЬ

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР, МИНИСТЕРСТВА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ СССР
И МИНИСТЕРСТВА ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР

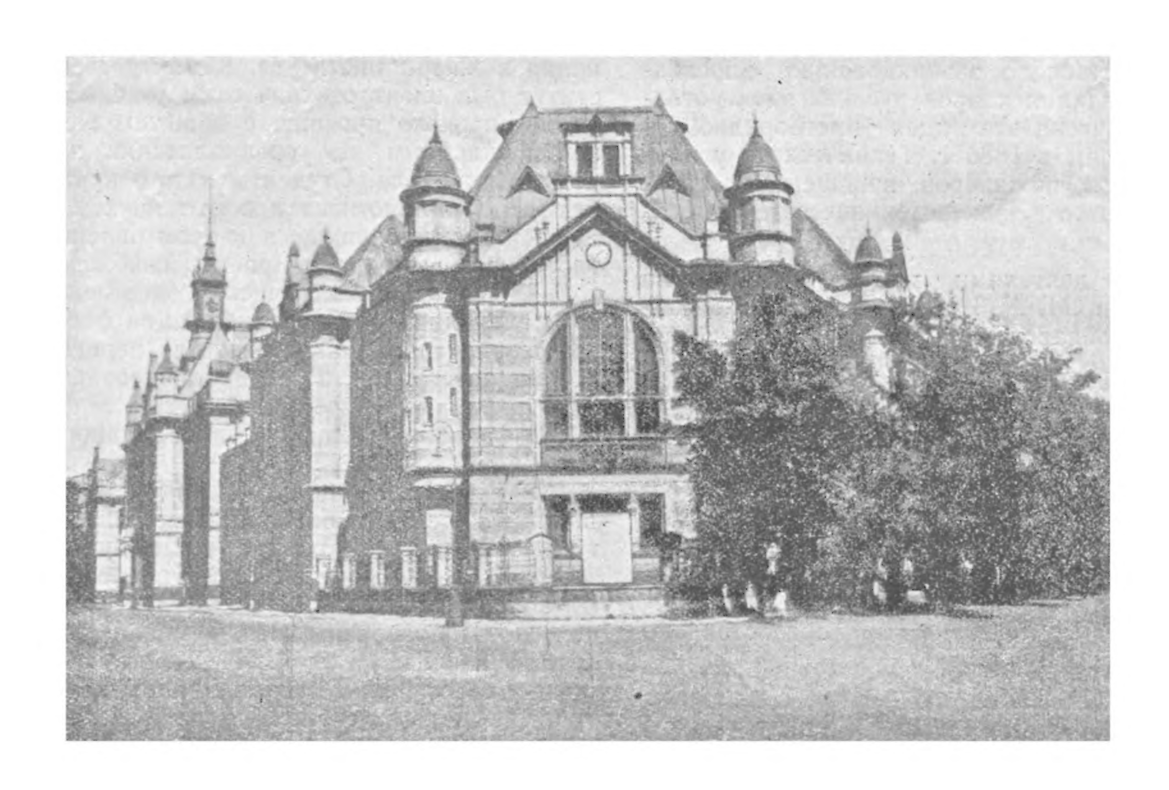
СОДЕРЖАНИЕ

✧ ✧ ✧



Адрес редакции: Москва, Б. Черкасский пер., д. № 2, тел. К 4-24-80.
Адрес для корреспонденции: Москва, Главный почтамт, почтовый ящик № 648.
Адрес для телеграмм: Москва Электричество

К 50-летию Ленинградского электротехнического института им. Ульянова (Ленина)



Ленинградский электротехнический институт им. Ульянова (Ленина)

Академик Г. О. ГРАФТИО

Сжатый исторический очерк создания и развития первого в России высшего электротехнического учебного заведения, ныне Ленинградского электротехнического института, составлен Г. О. Графтио — одним из старейших деятелей ЛЭТИ. Вслед за статьей Г. О. Графтио публикуются статьи А. Е. Алексеева, Д. С. Пашенцева, Б. П. Козырева, В. Е. Манойлова, посвященные итогам деятельности ЛЭТИ в разных областях электротехники, а также статьи С. А. Ринкевича, Н. П. Ермолина, Н. П. Богородицкого и А. В. Дмитриева, посвященные отдельным научным проблемам, которые разрабатываются в ЛЭТИ.

История первого в России высшего электротехнического учебного заведения — Ленинградского электротехнического института, получившего в 1918 г. имя основателя Советского государства В. И. Ульянова (Ленина), теснейшим образом связана с историей русской и советской электротехники, с электрификацией нашей страны. В период революции 1905 г. его первым директором был крупнейший русский ученый, изобретатель радио — Александр Степанович Попов.

Открытие в 1898 г. Электротехнического института явилось событием, которое, с одной стороны, было подготовлено всем развитием электротехники в предшествующий период, а с другой — связано с промышленным подъемом в России девяностых годов. Поэтому оно имеет свою предисторию.

Еще в семидесятых — восьмидесятых годах прошлого столетия, несмотря на социально-экономическую отсталость царской России, отдельные русские исследователи (А. Н. Лодыгин, П. Н. Яблочков, В. Н. Чиколев и др.) занимались вопросами применения электричества для практических целей. В начале восьмидесятых годов в среде передовой технической интеллигенции страны возникла идея объединения разрозненных сил русских электротехников с целью пропаганды электротехнических знаний

и содействия применению электричества в нашей стране. В январе 1880 г. был создан VI отдел Русского технического общества. В июле 1880 г. стал выходить журнал «Электричество». На страницах этого журнала широко развернулась пропаганда всех достижений в области электротехники и ее практического применения, что, несомненно, способствовало возникновению впоследствии идеи создания кадров русских электротехников. Практически эта идея претворилась в жизнь открытием в 1886 г. Технического училища телеграфных инженеров, явившегося первой ячейкой будущего Электротехнического института.

Основными деятелями этого училища были И. И. Боргман, М. А. Шателен, В. В. Скобельцын, П. В. Войнаровский, П. А. Кракау и др., которые осуществили в 1898 г. реорганизацию училища в Электротехнический институт и стали профессорами последнего.

В 1893 г. М. А. Шателен содействовал организации в училище первого кабинета электротехники, преобразованного в 1896 г. в электротехническую лабораторию, которой с этого времени руководил П. Д. Войнаровский. Оборудование для первой электротехнической лаборатории в значительной мере было предоставлено П. Н. Яблочковым.

Год открытия института совпал с крупным событием в России в области практического применения электротехники—постройкой грандиозного по тому времени инженерного сооружения: первой междугородней линии телефонной связи между Петербургом и Москвой.

19 марта 1898 г. под строительство здания Электротехнического института был отведен большой участок на Аптекарском острове. В новое прекрасное здание институт был переведен из старого помещения в 1903 г. На протяжении первого 1898—1899 учебного года происходила организация установленных «Положением института» десяти кафедр. В состав профессоров и преподавателей института в первом же году вошли: Н. С. Курнаков, Ю. Ф. Кригер, В. В. Дмитриев, А. Н. Векшинский (строитель здания института), Н. А. Кирпичев, М. А. Дешевой, А. А. Воронов, К. А. Поссе, Н. Н. Митинский, Е. Ю. Пистолькорс, П. В. Котурницкий, Л. П. Гейман, А. А. Кузнецов, Л. И. Толлочко, С. Н. Усатый и др. По сравнению с учебным планом училища учебный план института был значительно перестроен: из 15 электротехнических дисциплин только 4 были по электросвязи, 7—по сильным токам, остальные — общие.

К году открытия института общая мощность электрических станций Петербурга достигала 40 тыс. kW; на ряде заводов уже более или менее широко применялась электрическая энергия. Появилось применение электрохимии, электролиза меди. Тем не менее, статья П. Д. Войнаровского, помещенная в № 1 «Электротехнического вестника» за 1898 г., характеризует отсталость не только электротехнической промышленности того времени, но и подготовки инженерных кадров для нее.

Рост промышленности и строительство железных дорог в России вызвали потребность в инженерных кадрах. Учебный план института усложняется—появляется «Промышленное отделение». Одновременно происходят глубокие изменения в жизни института. К этому времени институт был электротехническим учебным заведением широкого профиля с общетехнической базой и уклонами по специализации, начиная с четвертого курса. Студенты пятого курса разрабатывали дипломные проекты двух категорий: 1) специализировавшиеся по промышленной электротехнике выполняли проекты снабжения какого-либо города электрической энергией для целей освещения или электрификации фабрик и заводов, электрической тяги и для передачи энергии на расстояние; 2) специализировавшиеся по телеграфам и телефонам—проекты телеграфных и телефонных сообщений для данного города или района.

Характерно мнение, высказанное тогда на совещаниях по разработке учебных планов института И. И. Боргманом, читавшим один из основных курсов—«Теоретическую электротехнику». Он заявил, что «разделение высшего электротехнического образования на две специальности: по слабым и сильным электрическим токам—совершенно невозможно, так как ни в науке ни в практике нельзя установить границы между слабыми и сильными токами». Это заявление одного из основателей ЛЭТИ блестяще подтверждалось на протяжении всего пятидесятилетнего существования института. Окончившие институт инженеры-электрики в практической своей деятельности успешно справлялись со всеми вопросами электротехники, вне зависимости от специализации на последних курсах, лишь благодаря широкой и серьезной общей электротехнической подготовке, полученной на протяжении всего срока обучения в институте.

За пятьдесят лет существования института в его стенах непрерывно появлялись и успешно развивались, отвечая запросам народного хозяйства и обороны страны, все новые и новые специальности, взаимно дополняющие друг друга и содействующие дальнейшему развитию единой науки и техники применения электричества. Введенное разделение сильных и слабых токов впоследствии отпало и с развитием электротехники было заменено также тесно связанными друг с другом электроэнергетикой и электрофизикой.

Значительна роль ЛЭТИ в развитии русской электрохимии. В конце прошлого столетия в металлургической и химической промышленности мира возник крупный интерес к воздействию на реакции такого мощного физического фактора, как электричество. С развитием электромашиностроения появилась реальная возможность применения электрического тока в химико-металлургических процессах.

В 1892 г. один из организаторов подготовки русских инженеров-электрохимиков проф. А. А. Кракау начал проводить занятия по «исследова-

нию гальванических элементов», а с 1897 г. эти занятия уже именовались «занятия по электрохимии». В 1906 г. по инициативе проф. А. А. Кракау учебный план института подвергся коренному пересмотру и в результате были организованы два отделения: электротехническое и электрохимическое. Электрохимическая наука быстро развивалась. Дореволюционные издания «Известий ЭТИ» были наполовину заполнены работами по электрохимии и электротермии. Среди них — блестящие классические работы профессоров и преподавателей института Н. С. Курнакова, Н А. Пушина, П. М. Аваева, А. В. Баскова, И. В. Гребенщикова, М. С. Максименко, П. Ф. Антипина и др. по электрометаллургии алюминия и натрия, по электрохимии металлических сплавов, по электротермии и физико-химическому анализу.

В революции 1905 г. приняли участие как профессорско-преподавательский состав, так и студенчество ЛЭТИ. 11 января 1905 г. состоялось экстренное заседание совета института, на котором был санкционирован перерыв занятий в институте до октября по решению сходки студентов. В возникших затем политических событиях профессора, преподаватели и студенты института принимали активное участие, и Электротехнический институт играл известную роль в развившемся революционном движении. В его стенах в период 1905—1907 гг. скрывался от преследований царской охранки В. И. Ленин. В нелегальном кружке студентов института, примыкавших к РСДРП, Ленин читал политические лекции; в честь этого в ЛЭТИ установлены мемориальные доски.

Первым выборным директором Электротехнического института стал А. С. Попов, инспектором — П. Д. Войнаровский, секретарем — А. А. Кузнецов. Этот период характеризуется значительными изменениями учебного процесса и повышением качества обучения студентов. Так, директор института А. С. Попов, руководивший также кафедрой физики, коренным образом переработал программы физики, создал физическую лабораторию и установил первую станцию изобретенного им радиотелеграфа в новом здании института. Была введена полная предметная система обучения студентов, значительно видоизменившая учебную жизнь института, предоставившая студентам возможность систематического самостоятельного изучения предметов в их логической последовательности. С четвертого курса специализация определялась дипломным проектом или дипломной работой. Быстрый рост учебных планов и программ института соответствовал требованиям развития электротехники.

В 1903—1904 гг. проф. В. В. Дмитриев спроектировал и построил первую в России учебную электрическую станцию, оборудованную всеми видами первичных двигателей; им же в тот период написаны и изданы первые в России классические, перерабатываемые в дальнейшем, учебные и научные руководства, как по основному курсу электрических станций, так и по комплексу связанных с ними вопросов. В. В. Дмитриев совместно со своим ближайшим помощником по кафедре С. А. Ринкевичем расширил учебную электрическую станцию установкой паротурбины с использованием мятого пара на отопление института и на базе произведенных в институте экспериментов изложил основы теории электрических станций, особенно развив раздел тепловых электростанций. В вопросах теплофикации, проектирования и строительства тэц В. В. Дмитриев является основоположником и пионером. Как известно, в развитии теплофикации Советский Союз далеко опередил капиталистические страны.

В 1907 г. в институте начал работу автор настоящей статьи. В институте были созданы одновременно две специальности: электрификация железных дорог и гидроэлектростанций, а также получила значительное развитие специальность «Передача электроэнергии на далекие расстояния высоким напряжением». В это время учениками Г. О. Графтио—Р. А. Лютером, А. А. Смуровым и др.—под его руководством были выполнены дипломные проекты гидроэлектростанций, высоковольтных линий передачи электроэнергии и электрификации железных дорог Закавказья, а И. В. Егиазаровым был составлен проект Днепровской гэс. Эти проекты впервые в России предусматривали передачу электроэнергии высоким напряжением — 110 kV на далекое расстояние.

Одновременно продолжалось развитие специальности электрической тяги на городских железных дорогах, которую организовал в институте заслуженный деятель науки и техники Я. М. Гаккель, автор и строитель первого дизель-электровоза.

В. В. Дмитриев, Г. О. Графтио, Я. М. Гаккель и другие профессора и преподаватели института в этот период вели не только большую научно-педагогическую работу, но прилагали все силы и изыскивали все возможности для проведения в жизнь своих передовых идей в электроэнергетике. Многочисленные проекты теплофикации В. В. Дмитриева, проекты и изыскания Г. О. Графтио составлялись при участии инженеров и студентов института и обсуждались в его стенах. Однако, ни один из этих крупных проектов, несмотря на усилия их авторов, не удалось осуществить при царском правительстве.

Проф. ЛЭТИ В. И. Коваленковым, ныне членом-корр. АН СССР, и проф. П. А. Азбукиным была разработана теория проводной связи и высокочастотной дальней связи. Позднее вопросы проводной связи разрабатывались в ЛЭТИ проф. Д. С. Пашенцевым.

В период, последовавший за Великой Октябрьской социалистической революцией, Электротехнический институт вступил с большим запасом накопленных научных и практических знаний во всех отраслях электротехники. Те новейшие и прогрессивные начинания в различных отраслях электротехники, которые тщетно пытались провести в жизнь до Октябрьской револю-

ции научные и инженерные силы, группировавшиеся в ЛЭТИ, получили свое широкое применение и встретили всемерную поддержку советского правительства и коммунистической партии.

Среди составителей плана ГОЭЛРО был автор статьи. К составлению этого плана были привлечены также И. В. Егиазаров, А. А. Смуров, В. В. Дмитриев, С. А. Ринкевич и др.

В ЛЭТИ в это время проф. И. В. Егиазаровым, ныне действительным членом Академии наук Армянской ССР, была создана собственная школа гидроэнергетиков, а также проведены большие научно-исследовательские работы, издан в трех частях капитальный труд «Гидроэлектрические силовые установки». Им же была построена в ЛЭТИ наиболее современная гидроэлектрическая лаборатория. По экспериментальным разработкам И. В. Егиазарова строилось большинство гидростанций СССР.

В настоящее время объединенная кафедра электрических станций возглавляется автором.

Вместе с осуществлением Волховской гидроэлектростанции и строительством линии электропередачи 110 kV на Ленинград в ЛЭТИ развилась научная школа по высокому напряжению и линиям электропередачи, созданная заслуженным деятелем науки и техники, проф. А. А. Смуровым. Эта специальность в настоящее время представлена группой кафедр и специализаций, развившихся на базе научных исследований богатейшей в СССР высоковольтной лаборатории имени ее основателя А. А. Смурова. Наука о способах передачи электрической энергии на дальние расстояния в значительной степени обязана трудам А. А. Смурова и его школе в лице профессоров, докторов техн. наук В. И. Иванова, Л. Е. Машкиллейсона, К. С. Архангельского, доцентов П. И. Рыжова, А. Н. Дмитриева и др.

Школа А. А. Смурова активно содействовала развитию завода «Электроаппарат». В ЛЭТИ была создана специальная кафедра аппаратостроения, возглавляемая ныне кандидатом техн. наук, доц. Г. Г. Швецом.

Организованные еще при жизни А. А. Смурова в его лаборатории работы по новым типам диэлектриков успешно ведутся в настоящее время доктором техн. наук, проф. Н. П. Богородицким.

В связи с постройкой Волховской гэс и других электростанций вырос и развился завод «Электросила» им. Кирова, где руководящие посты в разное время занимали питомцы ЛЭТИ, доктора техн. наук, профессора: Р. А. Лютер, В. К. Горелейченко, А. Е. Алексеев, В. Т. Касьянов и др. В стенах ЛЭТИ кафедрой этой специальности руководил проф. Ф. И. Холуянов, создавший первые русские учебники по электрическим машинам.

В период выполнения первых сталинских пятилеток помимо генерирования и передачи электрической энергии во всей широте стоял вопрос использования различных видов электроэнергии в народном хозяйстве. В стенах ЛЭТИ заслуженный деятель науки и техники, доктор техн. наук, проф. С. А. Ринкевич создал научную теорию электропривода, справедливо давшую ему общее признание крупного ученого и одного из пионеров электропривода в СССР. С. А. Ринкевич является пропагандистом идеи одиночного, а позднее многомоторного электропривода в промышленности и «сращивания» электромотора с машиной-орудием в одно целое. Завершением его научных изысканий эффективности электропривода было изучение способов автоматического управления электроприводом. В целях углубленного изучения электропривода С. А. Ринкевичем были созданы в ЛЭТИ специальные отраслевые лаборатории по электрическому приводу: автоматического управления, электрификации кораблей, электрооборудования подъемно-транспортных механизмов и металлообрабатывающих станков. Над оборудованием лабораторий работали его ученики, доценты Г. В. Одинцов, А. В. Фатеев, А. В. Берендеев, Б. И. Норневский и др.

В годы сталинских пятилеток школа электрохимиков ЛЭТИ заняла одно из ведущих мест. Кафедры электрохимического факультета возглавляются такими видными учеными, как М. С. Максименко, И. В. Гребенщиков, Ю. Ф. Кригер, П. Ф. Антипин, Н. И. Подкопаев, Б. П. Овсянников, В. С. Лызлов и др. В разные периоды в работе факультета принимали участие также К. К. Хренов, А. А. Алексеев, Ю. В. Баймаков, В. П. Ильинский, В. В. Стендер, Н. Н. Курнаков, В. А. Немилов и др. Научные исследования ЛЭТИ способствовали созданию передовой советской электротермии; в СССР было поставлено производство электростали и ферросплавов, карбида кальция, фосфора, кварца и абразивов, производство электродов и др. Советский алюминий, магний, натрий и другие легкие металлы были получены также при руководящем участии питомцев ЛЭТИ. Особенно плодотворна работа воспитанников ЛЭТИ в исследованиях и организации промышленности химических источников тока—свинцовых и щелочных аккумуляторов и гальванических элементов. Была выполнена самостоятельная разработка технологии производства щелочных аккумуляторов, имеющих крупнейшее значение в народном хозяйстве и в обороне СССР.

Специальность электросварки была организована впервые в СССР проф. ЛЭТИ А. А. Алексеевым. При содействии завода «Электрик» в институте была организована электросварочная лаборатория. Развитию этой специальности в ЛЭТИ много содействовал питомец института известный электросварщик, ныне действительный член Академии наук УССР К. К. Хренов.

Одновременно с развитием электроэнергетических специальностей в ЛЭТИ создавались новые специальности, объединяемые одним общим наименованием электрофизики. Начало, заложенное в ЛЭТИ великим изобретателем радио проф. А. С. Поповым, было продолжено проф. И. Г. Фрейманом и развито проф. А. И. Бергом, ныне академиком, которому принадлежит заслуга создания учебников и методов расчета радиопередающих устройств и организации радиоспециа-

лизаций ЛЭТИ, многих кафедр, лабораторной базы и всего учебного и научно-исследовательского процесса в этой области. В создании радиотехнической специальности в институте следует отметить также деятельное участие докторов техн. наук, профессоров А. Н. Щукина (ныне члена-корр. Академии наук СССР), В. И. Сифорова, М. С. Неймана, В. И. Моделя, Е. Я. Щеголева, Г. А. Кьяндского, С. И. Панфилова и др.

Коллектив специалистов радиотехники ЛЭТИ проявил большую дальновидность, посвятив вопросу освоения техники ультракоротких волн большое внимание еще в 1932—1937 гг. В ЛЭТИ выполнен ряд научно-исследовательских работ по технике ультра-коротких волн.

Отечественная война вызвала необходимость в целом ряде новых приборов и аппаратов в области ультракороткого и дециметрового диапазона. В 1945 г. в ЛЭТИ в соответствии с этими запросами введена новая специализация в этой области.

В период Отечественной войны была организована также кафедра «Технологии производства радиоаппаратуры». Лаборатория телевидения, организованная в ЛЭТИ в 1940 г. В. А. Гуровым, была развита после создания специализации телевизионной техники проф. Я. А. Рыфтиным.

Последовавший в военные годы прогресс радиотехники, и особенно многоканальной радиосвязи, телевидения и др., вызвал необычайное развитие радиотехнических электронных приборов. Вместе с тем широкое внедрение электровакуумных приборов во все области техники чрезвычайно увеличило удельный вес применения этих приборов неспециально радиотехнического назначения. Таким образом, появилась необходимость в двух различных профилях специалистов электровакуумной техники. В 1930 г. на базе первой лаборатории М. М. Глаголева и Б. П. Козырева в ЛЭТИ была организована электровакуумная специальность, первым руководителем которой был проф. М. М. Глаголев, а затем проф. А. А. Шапошников; учреждение новой специальности в институте совпало с подъемом нашей электровакуумной промышленности. Электровакуумная техника быстро растет, совершенствуется и приобретает большое значение в самых разнообразных отраслях. В этой области следует отметить выполненные в институте работы проф. Ф. Н. Хараджа, доцентов Б. П. Козырева, Ю. А. Кацмана и др.

Огромную научную работу в области разработки ионных приборов выполнил член-корр. Академии наук СССР, проф. В. П. Вологдин, организовавший в ЛЭТИ лабораторию электротехники высоких частот, преобразованную решением правительства в Научно-исследовательский институт высоких частот. В. П. Вологдиным был предложен и разработан новый метод поверхностной закалки токами высокой частоты, широко использованный в оборонной промышленности, а также метод высокочастотной вакуумной пайки.

Одновременно в ЛЭТИ развивалась другая боковая ветвь радиотехники. Трудами доктора техн. наук, проф. С. Я. Соколова в ЛЭТИ была создана лаборатория, а затем и кафедра электроакустики, сочетающей электротехнику с техникой звуковых и ультразвуковых частот; метод этот получил широкое применение в промышленности, в частности для обнаружения дефектов в металлических изделиях и деталях.

По окончании войны, в течение 1945 г., институт не только восстановил свои кадры и оборудование, но и подверг пересмотру и дополнению весь комплекс кафедр и специальностей, сложившихся за пятьдесят лет существования института. Вместе с тем при помощи и влиянии ЛЭТИ достигло высокого развития преподавание электротехнических наук во многих других высших учебных заведениях.

Война выдвинула новые отрасли электротехники. В ЛЭТИ появились новые кафедры и специальности. Широкое развитие получили в институте электроэнергетика и электрофизика.

За 50 лет институт дал стране свыше 5 000 инженеров-электриков по различным отраслям электротехники. Надо отметить, что из указанного количества 4 400 чел. подготовлены за годы Советской власти. Многие питомцы и деятели ЛЭТИ за выдающиеся работы в области науки и техники удостоены сталинских премий и награждены орденами и медалями СССР.

Наличие в Ленинграде крупных, совершенных и разнообразных по выпускаемой продукции электротехнических заводов, а также электростанций, оснащенных новейшим оборудованием, служит в дополнение к институтским лабораториям богатой научно-технической и учебной базой института.

Учебная и научная деятельность ЛЭТИ при возросшем контингенте студентов, профессорско-преподавательского персонала, количества лабораторий и новых дисциплин требует значительного расширения помещений института. Территория, занимаемая ЛЭТИ, предоставляет широкие возможности для развития учебно-лабораторной базы. Поэтому строительство новых корпусов, прерванное войной, в настоящее время по решению правительства возобновляется.

Электротехнический институт, руководствуясь в своей работе указаниями вождя советского государства Иосифа Виссарионовича Сталина, приложит все силы к тому, чтобы обеспечить страну кадрами высококвалифицированных инженеров-электриков по всем отраслям электротехники.

✧ ✧ ✧

Инженеры-электрики Ленинградского электротехнического института им. Ульянова (Ленина) в электромашиностроении СССР

Доктор техн. наук, проф. ***А. Е. АЛЕКСЕЕВ***

Ленинградский электротехнический институт им. Ульянова (Ленина)

Уже первые выпуски инженеров-электриков первого в России высшего электротехнического учебного заведения дали стране ряд видных электромашиностроителей. Среди них хорошо известны имена С. Н. Усатого, Е. Н. Фридберга и Г. А. Люста. Втроем они положили начало передовой по своим традициям школе электромашиностроения Ленинградского политехнического института. Наиболее широкую известность стяжал Г. А. Люст своими исследованиями периода 1911—1916 гг., посвященными вопросам параллельной работы дизель-генераторов. Его выводы относительно влияния частоты и интенсивности колебания силы света электрических ламп на сетчатку глаза на много лет опередили лучшие современные автору работы.

Затем должны быть упомянуты Ф. И. Холуянов и В. К. Горелейченко. Ф. И. Холуянов около 25 лет ведал кафедрой электрических машин ЛЭТИ. В. К. Горелейченко заведует сейчас кафедрой электрических машин Ленинградского института инженеров водного транспорта; в период 1919—1925 гг. он был директором завода «Электросила». Позже пост технического директора этого же завода в течение нескольких лет занимал М. И. Московский — в настоящее время заведующий кафедрой электротехники в Пензенском индустриальном институте. М. И. Московский в конце двадцатых годов был техническим директором завода «Электрик». Под его руководством были налажены новые производства электрических машин, а также сварочного оборудования и машин на обоих названных заводах.

Особо следует отметить роль в нашем электромашиностроении Р. А. Лютера, окончившего в 1911 г. Петербургский электротехнический институт. Практическую школу электромашиностроения он прошел на заводе «Вольта» в Ревеле, затем после Великой Октябрьской социалистической революции до перевода в 1923 г. на завод «Электросила» работал в отделе электрических железных дорог в Ленинградском отделении электромашиностроительного треста. Р. А. Лютер, шеф-электрик завода «Электросила» им. Кирова, выдающийся теоретик-инженер. Им или под его руководством были рассчитаны и первенцы нашего энергетического электромашиностроения—генераторы для Волховской и Земо-Авчальской гидростанций, много гидрогенераторов более поздней постройки, а также турбогенераторы, стяжавшие заводу «Электросила» мировую славу. Кроме того, он известен как автор работ, посвященных наиболее глубоким теоретическим вопросам современного электромашиностроения. Особого внимания заслуживают работы, трактующие переходные режимы синхронных машин с точки зрения теории двух реакций.

В дореволюционное время окончили электротехнический институт известные специалисты по трансформаторостроению А. В. Трамбицкий и А. И. Синица. Помимо большой практической работы, которую вел А. В. Трамбицкий на заводе «Электросила» в первой половине двадцатых годов, он широко известен своими исследованиями по вопросам проектирования трансформаторов. А. И. Синица после передачи трансформаторного производства с завода «Электросила» на Московский трансформаторный завод был переведен на этот же завод, где и ведет большую работу. А. В. Трамбицкий погиб во время блокады в Ленинграде.

Значительно большее число воспитанников ЛЭТИ, плодотворно работавших в электромашиностроении, относится к послеоктябрьским выпускам, в особенности после организации в 1929 г. специализации электромашиностроения, возглавляемой кафедрой электрических машин. В кратком очерке невозможно их даже перечислить. Многие занимают ответственные посты на наших электромашиностроительных заводах. Среди них мы видим и директоров заводов, и главных инженеров, и заведующих ответственными лабораториями. Многие успешно работают в научно-исследовательских институтах и в конструкторских бюро в качестве конструкторов. В дальнейшем упоминаются только те, чья деятельность в заметной мере определила лицо современного советского электромашиностроения.

В первые послереволюционные годы, в период восстановления нашей электропромышленности, электромашиностроители, окончившие ЛЭТИ, работали, главным образом, на ленинградских электромашиностроительных заводах «Электрик» и «Электросила» им. Кирова. Можно с полным правом утверждать, что именно на этих двух заводах было положено начало всем ведущим отраслям советского электромашиностроения.

На заводе «Электрик» зародилось современное тяговое электромашиностроение, были построены первые в СССР сварочные электрические машины и аппараты, высоковольтные генерато-

ры постоянного тока. На этом же заводе зародились машины повышенной частоты. На заводе «Электросила» положено начало высоковольтному аппаратостроению, переведенному затем на специализированный аппаратный завод в Ленинграде же, и, как уже отмечалось, трансформаторостроению. Завод «Электросила» явился пионером также и в деле энергетического электромашиностроения и, наконец, в вопросах постройки специальных машин различного рода.

Гидрогенераторы и паротурбогенераторы завода «Электросила» пользуются заслуженной мировой известностью. В этих областях электромашиностроения завод выполнил рекордные для всего мира машины: Рыбинские гидрогенераторы и двухполюсные турбогенераторы 100 тыс. kW при 3 000 об/мин Челябинской и Сталиногорской электростанций.

В 1922—1924 гг. на заводе «Электрик» автор руководил отделом электромашиностроения, которым были спроектированы и построены первые тяговые электродвигатели для тепловозов (тяговые двигатели мощностью 100 kW для первого в мире крупного тепловоза Гаккеля), первая в СССР серия трамвайных двигателей (серия ПТ) и машины постоянного тока мощностью 3 kW при 3 000 V. Насколько известно, для 1923 г. это были первые в мире высоковольтные машины постоянного тока промышленного образца. В том же году в Москве состоялась сельскохозяйственная выставка, на которой эта высоковольтная машина была в числе демонстрировавшихся на выставке промышленных экспонатов и удостоилась одной из первых премий.

К концу 1923 г. упомянутым отделом электромашиностроения завода «Электрик» была разработана серия машин постоянного тока открытого вентилированного исполнения в диапазоне мощностей от 0,4 до 35 kW. Можно отметить, что при выпуске этой серии была разработана конструкция первой построенной в СССР сварочной машины постоянного тока. Испытания в мае 1924 г. показали хорошую работу в режиме сварки. Машина явилась исходной для развития серии сварочных машин завода «Электрик». Тогда же были построены высокочастотные генераторы однофазного тока мощностью в 60 kVA, причем впервые в практике завода «Электрик» для машин этой категории гарантировались величины повышения и падения напряжения на зажимах машины при разгрузке ее и при нагрузке.

В дальнейшем работу по высокочастотным машинам вели Н. П. Белянинов (ум. в 1945), Ю. П. Петрунькин (ум. в 1942) и М. М. Алексеева, которая до настоящего времени ведет расчет всех высокочастотных машин, выпускаемых заводом «Электрик», и с 1946 г. читает специальный курс этих машин в ЛЭТИ. Ей же принадлежит приоритет в применении сокращенного шага в однослойных эвольвентных обмотках. На заводе «Электрик» участие в разработке сварочного электрооборудования принимали Л. И. Ахун (1925—1944 гг.) и автор (1926—1941 гг.).

В 1924 г. на заводе «Электрик» была разработана серия ПТ трамвайных двигателей, расчеты которых провела М. М. Алексеева. Постройка машин этой серии была поручена заводу «Электросила». Для своего времени эти тяговые двигатели означали определенный прогресс: они были выполнены, как цельнокорпусные вентилируемые машины, что было впервые реализовано в тяговом электромашиностроении наших заводов. На заводе «Электросила» эта серия в 1925 г. была дополнена еще двумя типами: ПТ-30, ПТ-35 (ПТ-35*а*); в расчетах, проведенных Б. Н. Красовским, принимал участие Р. А. Лютер. Серия ПТ описана на страницах журнала «Электричество», (№ 5—6, 1928). По весовым показателям двигатели этой серии еще до 1940 г. («Электричество», № 10, стр. 72, 1940) занимали первые места.

Основная творческая работа на заводе «Электросила» в середине двадцатых годов шла по двум главным направлениям: постановка и развитие гидрогенераторостроения и широкое развертывание турбогенераторостроения, как серийного производства. Гидрогенераторы до революции совершенно не строились на русских заводах. Сооружение турбогенераторов в очень незначительном объеме было начато в конце войны 1914—1918 гг. на заводе «Вольта» в Ревеле. В 1918 г. начатые постройкой в Ревеле машины были перевезены в Ленинград. В 1924 г. завершение их было поручено заводу «Электросила».

Работа в области гидрогенераторостроения на заводе «Электросила» начинается постройкой земоавчальских и волховских генераторов. Генераторы для Волхова были одними из крупнейших по габаритам машинами в мире для времени их постройки. Расчет и конструирование генераторов для обеих станций в основном вели Р. А. Лютер и автор. Конструктивная схема генераторов и исполнение основных частей характерны для того времени. Станины, крестовины и основания генераторов были литыми чугунными, роторы отливались из стали. Обмотки статора—однослойные с гильзовой изоляцией. Охлаждение земоавчальских генераторов осуществлено по замкнутому циклу с водяными поверхностными воздухоохладителями. Насколько известно автору, это были первые в мире гидрогенераторы с такого рода охлаждением. Лишь в конце двадцатых годов появились в Америке первые гидроэлектростанции с генераторами, имеющими аналогичное охлаждение.

Как на Волховской, так и на Земо-Авчальской станциях первенцы советского гидрогенераторостроения были пущены в эксплоатацию в 1927 г. Более чем двадцатилетняя безаварийная работа генераторов свидетельствует о высоком качестве этих машин.

Обработка основных механических частей генераторов велась вне завода «Электросила». Крупногабаритные части (станины, основание и несущие крестовины) волховских генераторов обрабатывались на Ленинградском металлическом заводе им. Сталина и на Балтийском судостроительном заводе, что требовало, несомнен-

но, дополнительных организационных мероприятий со стороны завода «Электросила».

Части ротора генераторов для Земо-Авчальской станции обрабатывались на одном из заводов г. Николаева. Испытание на угонную скорость роторов проведено непосредственно в цехах этого завода. Для волховских роторов на заводе «Электросила» построили в одном из цехов разгонную яму, в которой посредством электродвигателей, установленных на легкой конструкции типа мостовых ферм, производились испытания роторов на угонную скорость. Яма во время производства испытания оставалась открытой. Такого рода подход к проведению ответственнейшего испытания свидетельствует об уверенности конструктора в методах своих расчетов частей ротора на прочность и в правильном выборе материала отливок.

В конце двадцатых годов в генераторостроении намечается переход на новую, более высокую ступень как в отношении расчетов, так и в отношении конструкции.

Результатом творческого освоения передового технического опыта была постройка заводом «Электросила» крупнейших в мире для начала тридцатых годов днепровских гидрогенераторов. Генераторы, рассчитанные Р. А. Лютером, имеют непревзойденную пока центробежную силу на башмаках полюсов ротора. Генераторы конструктивно уже отличаются от указанных выше двух машин. Статор генератора — сварной, ротор шихтованный, собранный из листовой стали. Обмотка статора выполнена однослойной эвольвентной, что являлось переходным этапом к двухслойным обмоткам более позднего времени.

Постройка нового корпуса на заводе и переход на сварные конструкции позволили вести обработку всех деталей свирской и днепровской машин на заводе «Электросила», не прибегая к помощи других предприятий.

На заводе проводились грандиозные работы. Наружный диаметр станины свирского генератора составлял около 10 m, наружный же диаметр станины днепровского генератора, еще более величественной машины, превышал 12,5 m.

Автору приятно вспомнить, в особенности в связи с высокой правительственной наградой, полученной им в апреле с. г. за работу на заводе «Электросила», что ответственность за производство как свирских, так и днепровских машин правлением Государственного электромашиностроительного треста была возложена на него. В апреле с. г. награжден также Р. А. Лютер, в рабочем и дружном единении с которым проводилась работа по свирским и днепровским генераторам. Одновременно награжден заведующий теперь гидрогенераторным отделом конструкторского бюро завода «Электросила», также питомец ЛЭТИ, А. С. Еремеев. За разработку рыбинских генераторов ему в свое время была присуждена Сталинская премия.

Основные вехи на пути развития советского турбогенераторостроения были также расставлены специалистами школы ЛЭТИ.

В 1924—1925 гг., когда на заводе «Электросила» достраивались турбогенераторы, спроектированные еще на заводе «Вольта», были намечены расчетно-конструктивные контуры серии турбогенераторов завода. Была принята конструкция цельного фрезерованного ротора с массивными бандажами. Некоторые деятели электропромышленности рекомендовали тогда заводу пойти по пути германской фирмы AEG. Фирма широко рекламировала в то время свои турбогенераторы, в которых применялись роторы со вставными зубцами и проволочными бандажами. Завод «Электросила» отстоял свою конструкцию. В дальнейшем опыт эксплоатации подтвердил правильность выбранного пути. Не было более трудных в практике эксплоатации наших электростанций турбогенераторов, чем генераторы фирмы AEG: неполадки имели место как в роторах, так и в статорах.

В качестве иллюстрации опишем в основных чертах выполненный в конце двадцатых годов турбогенератор мощностью 6 000 kW при 3 000 об/мин. Генератор выполнен со сплошным ротором с массивными бандажами. Сварная станина имеет косые «карманы» для так называемой продольно-секционированной вентиляции по оригинальной схеме завода «Электросила». Нужно отметить еще одну характерную черту для турбогенераторов завода «Электросила» постройки того же периода: описываемая машина имеет диаметр расточки статора 800 mm при активной длине 1 400 mm. Оптимальным диаметром для машин этой мощности является в современных машинах величина порядка 650—700 mm. Строя свои машины с диаметрами, бо́льшими, чем оптимальные, завод решал две задачи: 1) получались более короткие машины, что было технически весьма существенно, так как завод в то время не имел расточного станка, а карусельные не позволяли обрабатывать станину с длиной, превосходящей приблизительно 2 000 mm; 2) постройкой такой очередной машины завод «завоевывал» новый размер диаметра, что усиливало позиции завода, когда он рекомендовал снятие с импорта машин мощностей, больших, чем уже освоенные в производстве завода.

Заслуживает внимания турбогенератор мощностью в 30 000 kW в двухполюсном исполнении того же периода постройки. Помимо цельной станины, что объяснялось отсутствием расточного станка, он имел ряд других особенностей, характерных для той эпохи. Некоторые из них показывают, что уже в ту пору завод правильно наметил основные элементы конструкции двухполюсных генераторов предельных мощностей. Вспомним, что для конца двадцатых годов трубоагрегаты мощностью в 30 000 kW в двухполюсном исполнении были действительно машинами предельных мощностей. В представленной машине предусмотрены секционированная вентиляция, встроенные вентиляторы с направляющим устройством для подходящего к вентиляторам воздуха, обмотка ротора выполнена без

заметного отгиба к центру, возбудитель дан в виде отдельной машины на самостоятельных подшипниках.

Удачным исполнением этой предельной по мощности машины завод «Электросила» уже в 1930 г. выдвинулся в передовую шеренгу лучших электромашиностроительных заводов мира.

Использование собственного богатейшего опыта и творческое освоение лучшего из того, чем располагала зарубежная практика, привели завод «Электросила» к созданию рекордной машины мира—двухполюсного турбогенератора мощностью в 115 000 kW при 50 Hz с водородным охлаждением. В тонких вопросах расчетов прочности и вообще механических задачах, связанных с этими рекордными машинами, руководящую роль играл Б. Н. Красовский.

Переходя к крупным машинам постоянного тока — машинам, играющим огромную роль в деле развития черной металлургии, следует отметить большое значение в вопросах расчета и наладки этих машин работ В. Т. Касьянова. В. Т. Касьянов хорошо известен читателям журнала «Электричество», также как автор обобщенной теории бесколлекторных машин переменного тока. Постоянным помощником В. Т. Касьянова в вопросах расчета крупных машин постоянного тока в течение долгих лет является питомец ЛЭТИ инженер-электрик И. Н. Рабинович.

В заключение следует отметить работы воспитанника ЛЭТИ П. А. Фридкина, который изобрел дуговые машины трехфазного тока.

Этот краткий очерк показывает, что инженеры-электрики, питомцы Ленинградского электротехнического института им. Ульянова (Ленина), принимали руководящее участие в создании ряда основных отраслей советского электромашиностроения.

◇ ◇ ◇

Первая русская школа электросвязи

Доктор техн. наук, проф. Д. С. ПАШЕНЦЕВ

Ленинградский электротехнический институт им. Ульянова (Ленина)

Блестящие работы русских ученых: первого изобретателя электромагнитного телеграфа П. Л. Шиллинга и Б. С. Якоби послужили основой для необыкновенно быстрого развития техники связи.

За короткий срок со дня изобретения П. Л. Шиллинга и Б. С. Якоби телеграф становится фактором огромного значения в общественной, политической и культурной жизни человека.

В период 1832—1880 гг. в России и за границей появляются многообразные новые системы телеграфных аппаратов, позволяющих осуществлять передачу электрических сигналов на большие расстояния с огромной скоростью. Ручная работа на аппаратах в дальнейшем заменяется автоматической. От условных сигналов приема совершается переход на буквопечатающий прием. В результате совершенствования и развития техника передачи сигналов на расстояние обогащается созданием систем аппаратов многократного использования линии и передачи изображений по ним (рисунков, фотоснимков, чертежей, автографов и т. п.). С каждым годом десятки и сотни тысяч километров телеграфных линий вводятся в эксплоатацию, используя все эти разнообразные системы аппаратуры. Потребность в быстрой телеграфной связи, объем корреспонденции непрерывно возрастают. Для удовлетворения этой потребности техника телеграфии дает новые методы передачи и приема сигналов, позволяющие эффективно использовать аппаратуру и линии в эксплоатационных условиях и с точки зрения экономики.

В начале 80-х годов прошлого века в России насчитывалось около трех тысяч телеграфных станций и тысячи аппаратов различных систем. Телеграфная сеть проводов простиралась почти на 30 000 km. В 1882—1883 гг. в России были устроены и открыты для пользования телефонные станции в С.-Петербурге, Москве, Киеве, Варшаве, Лодзи, Одессе и Риге.

С появлением сложных систем аппаратуры дальней связи для эксплоатации ее недостаточны были простые навыки и опыт практического обслуживания устройств. Необходимы были уже глубокие теоретические знания в области электротехники и механики для понимания сложных конструкций механизмов и электромагнитных процессов, которые лежат в основе телеграфной и телефонной связи.

Эти соображения выдвинули необходимость подготовки специалистов телеграфно-телефонного дела, обладающих требуемыми инженерными познаниями. Идея об учреждении специального учебного заведения — телеграфного института возникла в 1884 г. Такое учебное заведение (сначала на правах 3-годичного технического училища) было открыто в Петербурге в 1886 г. Училище подготавливало техников, которые после окончания и двухлетней стажировки имели право защищать дипломный проект на звание инженера.

После первого выпуска 52 чел. в 1889 г. выявилась необходимость преобразования училища в высшее учебное заведение. Училище было реорганизовано в Электротехнический институт с 4-годичным курсом обучения. В 1898 г. в связи с развитием телеграфного и телефонного дела в стране и научными достижениями в области электротехники программы специальных и общетехнических дисциплин значительно расширяются. Электротехнический институт переходит на пятилетний курс обучения, нормальный для высших учебных заведений.

Петербургский электротехнический институт с этого момента является первой русской высшей школой связи и центром электротехнических знаний. К работе в нем привлекаются крупнейшие научные силы: И. И. Боргман, М. А. Шателен, В. Ф. Миткевич, Н. Л. Кирпичев, Н. С. Курнаков, К. А. Поссе, В. В. Скобельцын, П. Д. Войнаровский, О. Д. Хвольсон и др.

Этими первыми научными деятелями института был заложен прочный фундамент, обеспечивший успешное развитие в институте преподавания теоретических основ электротехники и прикладных ее отраслей.

За время до 1917 г. силами института написано и издано около 50 учебников и 250 статей, из которых большое количество падает на дисциплины телеграфии, телефонии и сигнализации.

Начиная с 90-х годов, десятки инженеров-связистов, выпускаемых институтом, приходят на практическую работу в телеграфное ведомство и на железнодорожный транспорт, способствуя развитию техники телеграфии и телефонии в стране.

Проводная телеграфная и телефонная связь России достигает заметных успехов в своем развитии в течение короткого периода. К началу войны 1914 г. страна насчитывает свыше миллиона километров телеграфных цепей, значительное количество телеграфных аппаратов различных систем.

Техника телефонии находит не менее широкое применение. Сооружаются телефонные станции в городах. Начинает расти и практически осуществляться междугородная телефонная связь. Строятся и вводятся в эксплоатацию цепи большого протяжения

Начало XX столетия явилось новым этапом в развитии техники электросвязи благодаря изобретению радио, сделанному русским ученым, профессором Электротехнического института А. С. Поповым.

Новая техника предъявляла новые требования к институту. С каждым годом институт увеличивал кадры подготовленных инженеров и с неослабной энергией растил в своих стенах кадры научных работников. В течение периода 1900—1914 гг. Электротехнический институт добился немалых успехов в развитии отечественной науки электросвязи, сосредоточив у себя крупные научные силы не только по общетехническим дисциплинам, но и выдающихся специалистов электросвязи, радио и сигнализации, большинство которых являлись воспитанниками самого института. Среди них необходимо отметить имена профессоров А. С. Попова, П. Д. Войнаровского, В. В. Дмитриева, Л. И. Шпергазе, П. Л. Щуркевича, Ф. И. Холуянова, П. А. Азбукина, В. И. Коваленкова, Н. О. Рогинского и др.

Трудами этих деятелей науки были созданы замечательные учебники, учебные пособия, оборудованы первоклассные лаборатории, издавались журналы и другая периодика.

После Великой Октябрьской социалистической революции инженерные и научные кадры, подготавливаемые Электротехническим институтом, широким потоком вливаются в отечественную электропромышленность. Перед институтом, которому 28 ноября 1919 г. присваивается имя В. И. Ульянова (Ленина), поставлена задача исключительного значения — дать инженерные кадры связистов, которые бы не только освоили технику промышленного производства средств электросвязи, но и обеспечили бы ее дальнейшее развитие в соответствии с огромными потребностями молодого социалистического государства.

В институте создаются три самостоятельные кафедры—проводной связи, радиотехники и СЦБ. Круг вопросов, охватываемых каждой из этих кафедр, значительно расширяется. Дисциплины дифференцируются, развиваются и крепнут на основе новых теоретических и экспериментальных исследований в области электросвязи. Перестраивается учебный процесс кафедр телеграфии, телефонии, радио и железнодорожной сигнализации, блокировки и централизации с целью подготовки инженеров-связистов не только для ведомств, эксплоатирующих средства связи, но и для предприятий промышленности.

Кафедра проводной связи кроме общих и специальных теоретических и прикладных дисциплин телеграфии и телефонии развивает дисциплины телеграфного аппаратостроения, телефонных ручных и автоматических станций. На кафедре вводится дисциплина «Дальняя связь».

С выделением радиотехники и затем СЦБ в самостоятельные кафедры вводятся кроме общих специальные дисциплины.

Актуальнейшим вопросом для техники проводной связи было научное теоретическое обобщение электромагнитных процессов телеграфно-телефонной передачи по проводам. Литература по этому вопросу была крайне бедна. Отдельные вопросы теоретических основ передачи не были совершенно освещены. На кафедре велась целеустремленная работа по восполнению этого существенного пробела. Значительными достижениями в этом направлении явились известные работы проф. В. И. Коваленкова. Его теоретические и экспериментальные работы по теории связи, охватившие широкий круг вопросов, послужили первым и основным научным фундаментом, на котором была построена теория связи, положенная в основу построения учебников и пособий для студентов и инженеров-связистов.

Особого внимания заслуживают разработанные им с исключительной полнотой такие вопросы, как установившиеся и устанавливающиеся электромагнитные процессы в надземных линиях, теория четырехполюсника, фильтры, теория местных цепей и др. В его трудах—учебниках, учебных пособиях и монографиях получила широкое освещение также прикладная техника телефонии (телефонная аппаратура, телефонные станции, междугородные телефонные станции и др.).

Теоретические научные разработки, проведенные В. И. Коваленковым, и его изобретения получили высокую оценку. В 1943 г. ему присвоено высокое звание лауреата Сталинской премии.

Особенно выдающейся заслугой В. И. Коваленкова является работа, проведенная им в Электротехническом институте в области дальней телефонии.

Разработанная В. И. Коваленковым первая трансляция низкой частоты на электронных лампах разрешила вопрос дальнего телефонирования.

Теоретические предпосылки и исследования вопросов многократного телефонирования, проведенные В. И. Коваленковым и П. А. Азбукиным в период их пребывания в Электротехническом институте, послужили основой для разработки и конструирования первой в СССР установки, позволившей осуществить по одной телефонной цепи сначала два, а затем несколько одновременных разговоров.

Почти одновременно с вопросом о многократном телефонировании был решен вопрос использования телефонной цепи, уплотненной несколькими каналами, и для телеграфной связи. Сотрудниками кафедры П. А. Азбукиным, В. И. Величутиным и Великиным разрабатывается первая установка «подтонального телеграфирования», позволяющая кроме нескольких разговоров по цепи осуществить одновременную встречную телеграфную передачу четырехкратным аппаратом. Бодо. Эта установка в промышленном оформлении вводится в эксплоатацию с 1926—1927 гг.

Одновременно с этими работами в области телеграфии кафедра проводной связи развивает усиленную деятельность в деле совершенствования связи.

Такой же рост и развитие наблюдаются в подготовке институтом инженерных кадров радистов. Преемники начатого в институте А. С. Поповым дела—И. Г. Фрейман, А. И. Берг, заведующие кафедрой радиотехники, с успехом продолжали его дело в теоретической и прикладной областях. В этой работе принимали активное участие виднейшие специалисты страны: А. А. Петровский, Д. А. Рожанский, К. Я. Щеголев, А. Ф. Шорин и др. Труды этих деятелей науки в области теоретической радиотехники, а также многообразного применения ее, широко известны.

Электротехнический институт сыграл также огромную роль в развитии связи, сигнализации, блокировки и централизации на железнодорожном транспорте, особенно после Октябрьской революции. На протяжении 1920—1927 гг. кафедра СЦБ, возглавляемая проф. Н. О. Рогинским и затем проф. М. И. Вахниным и проф. Н. В. Лупалом, добилась больших успехов в развитии и постановке специальных дисциплин, которые стали научной основой новой техники СЦБ.

Начало сталинских пятилеток явилось переломным моментом в работе Электротехнического института им. Ульянова (Ленина). Основное внимание его было направлено преимущественно на подготовку инженерных кадров для электропромышленности. Бо́льшая часть выпускаемых институтом инженеров связи направляется на заводы слабого тока: «Красная заря», им. Кулакова, им. Козицкого и в отраслевые лаборатории и научно-исследовательские институты. Значительно меньшая часть — в эксплоатационные ведомства связи и железнодорожного транспорта. Ввиду огромной потребности в инженерах связи для этих ведомств в 1929 г. был открыт новый институт — институт связи в Ленинграде и в 1930 г.—такой же институт в Одессе.

Наркомат путей сообщения создает в Ленинграде в 1930 г. Электротехнический учебный комбинат и в 1932 г. в Москве—Электротехнический институт сигнализации и связи.

Большая роль в организации этой мощной сети высших учебных заведений, в работе специальных кафедр и постановке учебного процесса принадлежит: в Ленинграде научным работникам ЛЭТИ — В. И. Коваленкову, Д. С. Пашенцеву, В. Н. Листову, Н. В. Лупалу, В. В. Величутину, М. Г. Цимбалистому и в Москве — воспитанникам Электротехнического института им. Ульянова (Ленина) — Г. В. Дашкевичу, Е. В. Китаеву, П. А. Азбукину, Б. С. Комарову, Н. О. Рогинскому.

Значительное влияние ЛЭТИ сказалось и на организации Военно-электротехнической Академии связи им. Буденного, которая с 1925 г. по 1929 г. находилась на правах военного отделения института и обслуживалась его основными кадрами.

Инженерные и научные кадры, воспитанные ЛЭТИ, сыграли весьма большую роль в развитии электросвязи в СССР. Воспитанники института явились творцами новой советской техники электросвязи, которая нашла широкое применение в народном хозяйстве страны. За время первых трех сталинских пятилеток советская электропромышленность освоила производство новейших систем телеграфной, телефонной и радиоаппаратуры.

К числу наиболее интересных разработок, которые определили техническую политику в области электросвязи, необходимо отнести:

а) по телеграфии — многократные телеграфные аппараты дуплекс, аппаратуру тонального телеграфа, фототелеграфную аппаратуру, телеграфные аппараты типа пишущей машинки (старт-стопные);

б) по телефонии — автоматические телефонные станции, аппаратуру дальней автоматической связи, учрежденческие автоматические станции, корабельные автоматические станции;

в) по дальней телефонной связи — трехканальную аппаратуру дальней связи, аппаратуру связи по линиям высокого напряжения, аппаратуру двенадцатиканальной системы дальнего телефонирования, аппаратуру тонального вызова;

г) по радиотехнике — радиопередающую аппаратуру для военно-морского флота, приемную радиоаппаратуру для магистральных центров, радиоволновые приемники, аппаратуру звукозаписи;

д) в области СЦБ—аппаратуру электрической централизации, релейной централизации и автоблокировки.

Приведенный краткий перечень разработок далеко не исчерпывает всех достижений новой техники электросвязи, радио и СЦБ, которые были результатом блестящей творческой работы советских связистов, в числе которых немало воспитанников ЛЭТИ.

В дни Великой Отечественной войны, когда Советский Союз мобилизовал свои усилия и средства для борьбы с немецкими захватчиками, когда Ленинград находился в блокаде, Электротехнический институт им. Ульянова (Ленина) не прерывал своей работы. Его усилия были направлены на оборону страны. Сотни учащихся и многие преподаватели были призваны или ушли добровольцами в Красную Армию. Но им на смену в стены института являлись новые и новые учащиеся, которые проходили теоретическую и практическую подготовку бойцов-связистов.

50-летняя история и деятельность Электротехнического института им. Ульянова (Ленина) дают основание быть уверенным в том, что институт, находясь в авангарде борцов за успешное дальнейшее развитие отечественной науки и техники, внесет свой вклад в дело быстрейшего решения актуальных задач великого плана послевоенной сталинской пятилетки.

◇ ◇ ◇

К развитию электровакуумной техники в СССР

Кандидат техн. наук, доц. Б. П. КОЗЫРЕВ

Ленинградский электротехнический институт им. Ульянова (Ленина)

До настоящего времени еще не написана история появления и развития электровакуумной лампы, которая внесла в жизнь человека новый свет, упразднила власть расстояний, позволила, как в волшебном зеркале, видеть далекие предметы и людей, сделала человека зрячим ночью и решила, в особенности в последние годы, много других задач, которые даже в недавнем прошлом могли бы казаться фантастикой и бесплодной мечтой.

Поэтому целесообразно хотя бы в нескольких словах напомнить некоторые даты из прошлого для того, чтобы сделать нагляднее динамический процесс роста электровакуумной техники и роль ЛЭТИ в ее развитии в СССР.

Подобно истории возникновения многих других технических приборов развитие электровакуумных ламп во всех их разновидностях на более ранних стадиях приводит нас к работам физиков.

В середине XVII века Торичелли и Бойлю удалось опровергнуть ложную доктрину о том, что природа боится пустоты. Опыты Вивиани в 1643 г., и в особенности известный эксперимент изобретателя насосов Герике в 1654 г., показали, что пустоту можно получать в сосудах значительных размеров. Однако, научившись получать вакуум, физики той эпохи не смогли найти применения этому ценному открытию, так как тогда электротехника не была еще развита, и лишь в 1883 г. Фарадей к циклу своих исторических опытов добавил эксперимент по наблюдению электрического разряда в эвакуируемом сосуде, сопровождавшийся открытием на пути разряда темного пространства, названного впоследствии его именем.

Хотя свечение разреженного воздуха было описано в опытах Гауксби в 1709 г., а Пикар замечал его еще раньше при движении ртути в пустоте, но это были лишь случайные наблюдения, реализованные слабыми средствами электростатики при электризации трением. Впрочем, и работа Фарадея по разряду в газе не отличалась столь существенными практическими результатами, как, например, его же опыты по электромагнитной индукции или электролизу—в ту эпоху совершенно не ощущалась та роль, которую могли бы эти электровакуумные эксперименты играть в науке или технике, а тем более в быту человека. Правда, Гассио, а затем Плюккер в 1854 г. приспособили свечение трубок с разреженными газами для спектральных исследований, а боннский стеклодув Гейсслер стал широко распространять названные впоследствии его именем трубки различных, порой замыслова-

тых, конфигураций, но в значительной мере это были лишь красивые эффектные демонстрации.

Однако уже и в ту эпоху было одно направление электровакуумной техники, особенно в России, которое носило вполне определенные практические цели — стремление создать электрический источник света. Открытие яркого свечения при дуговом разряде, сделанное русским ученым В. В. Петровым в 1802 г., показало большие возможности этого явления, но из-за отсутствия мощных источников питания и динамомашин в те годы не привело к практическому использованию дуги и обратило мысли изобретателей к созданию источника света в виде вакуумной лампы с накаленной внутри нее электрическим током нитью, которая в некоторых работах состояла из платины, в других — из угля. Осветительная лампа с применением угольного стерженька была создана, как известно, Лодыгиным в 1873 г. и усовершенствована Эдисоном в 1879—1881 гг.

Начало двадцатого столетия ознаменовалось замечательной работой П. Н. Лебедева, открывшего в 1902 г. действие светового давления на помещенную в вакуум пластинку и положившего начало понятию и расчетам по так знываемому радиометрическому эффекту, в свое время неверно объясненному Круксом.

Этот же период ознаменовался двумя важными датами в истории электронных ламп: в 1904 г. Флеминг заявил патент на диод-детектор, а в 1907 г. Де-Форест продемонстрировал свой новый «аудион», представлявший катодную лампу с управляющей сеткой.

Приблизительно в эти же годы были найдены технологически рентабельные методы обработки таких тугоплавких металлов, как вольфрам и молибден, и стали изготовляться тонкие проволоки и жесть из этих материалов, без которых почти немыслимо конструирование всех ламп.

Наконец, в период 1913 и 1916 гг. в результате работ Геде и исследований Лангмюра в распоряжении электровакуумщиков появились системы высоковакуумных насосов, обладавших большой скоростью откачки и не имевших изнашивающихся при работе частей.

Таким образом, электровакуумные работы получили достаточно прочную технологическую базу. Осветительные лампы, трубки Рентгена, модели РВ, катодные осциллографы с холодным катодом, первые типы катодных ламп показали свою практическую ценность. Для передовых людей того времени стало совершенно очевидным, что электровакуумный «пустой» прибор таит в себе еще ряд больших возможностей.

Однако электровакуумная промышленность в царской России была развита слабо. Завод «Светлана», открытый в 1914 г., на устарелом оборудовании типа 1907 г. давал в день лишь 500—600 шт. осветительных ламп и ничего больше не изготовлял; несколько мелких заводов под Москвой, носивших характер кустарных мастерских, тоже занимались изготовлением осветительных ламп и все вместе выпускали около 4,5 млн. шт. в год, причем 60% этих ламп было с угольной нитью, а вся сборка основана была на импортном оборудовании и полуфабрикатах. Трубки Рентгена изготовлялись в мастерской Федорицкого, размещенной на площади нескольких квартир в частном доме; причем выпускались лишь ионные трубки с капризными регенерационными устройствами, доставлявшими потребителям-медикам много неприятностей.

Но самым главным недостатком дореволюционной электровакуумной техники было полное отсутствие каких-либо разработок новых приборов, пренебрежение планомерной исследовательской деятельностью. Было, конечно, много талантливых людей, таких как Лодыгин, Столетов, Лебедев и др., но поддержки для своих работ и условий для развертывания своих сил они не находили. Это привело, между прочим, к тому, что патент Лодыгина на изготовление вольфрамовой нити и осветительной лампы был в 1890 г. приобретен американскими монополистами.

В 1917 г. положение с нашими электровакуумными работами резко меняется. Разрозненные подмосковные фабрики осветительных ламп объединяются в 1917 г. в МОФЭЛ (Московское объединение фабрик электроламп), а через десять лет, в 1927 г., возникает «Электрозавод» — крупнейший центр по осветительным лампам, который уже в 1927—1928 гг. дал в год вдвое больше ламп, чем давали все заводы дореволюционной России за такой же срок.

В 1925 г. завод «Светлана» наладил получение отечественного вольфрама и молибдена и вскоре импорт этих материалов был полностью прекращен.

Почти одновременно с мероприятиями по развитию промышленной базы для осветительных ламп предпринимаются решительные шаги и в направлении постановки у нас производства более сложной электровакуумной аппаратуры — радиоламп, ртутных выпрямителей и трубок Рентгена.

Исторически наиболее ранние отдельные экземпляры электронных ламп в России были изготовлены в ЛЭТИ в 1912—1913 гг. В. И. Коваленковым, а первые образцы генераторных и усилительных катодных ламп, разработанных под руководством Н. Д. Папалекси, серийно изготовлялись уже в 1914 г. на заводе Русского общества беспроволочных телеграфов и телефонов (РОБТиТ) и оказали большое влияние на развитие радиотехники в период первой мировой войны. Однако в 1917—1918 гг. в связи с закрытием завода выпуск этих ламп был прекращен. В 1921—1922 гг. при содействии В. И. Ленина развивается деятельность Нижегородской радиолаборатории, в которой под руководством М. А. Бонч-Бруевича вскоре создаются двухкиловаттные генераторные лампы с водяным охлаждением. На этих лампах начинает функционировать самая мощная в мире в тот период радиотелефонная станция им. Коминтерна в Москве.

Примерно около 1921 г. в Одессе сначала в лаборатории Политехнического института, а за-

тем на территории Одесского государственного радиозавода под руководством Н. Д. Папалекси были возобновлены разработка и изготовление генераторных и усилительных катодных ламп.

Осенью 1922 г. на территории бывшего радиозавода (РОБТиТ) в Ленинграде Трест заводов слабого тока пустил электровакуумный завод, в котором группа сотрудников, руководимая М. М. Богословским, при активном участии С. А. Векшинского, Ф. Н. Хараджа, А. А. Шапошникова и др., разработала новые конструкции усилительных и генераторных ламп, а в отделе трубок Рентгена начали изготовляться сначала трубки ионного типа, а затем и трубки с горячим катодом.

В 1925 г. на территорию Электровакуумного завода была переведена из Нижегородской радиолаборатории группа В. П. Вологдина, положившего начало еще в 1921 г. разработке и изготовлению в СССР стеклянных типов ртутных выпрямителей, необходимых для устройств, питающих радиопередатчики.

Темпы развития Электровакуумного завода и потребности в электровакуумных приборах возрастали столь быстро, что уже в 1928 г. пришлось этот завод перевести в более крупное помещение завода «Светлана», из которого производство осветительных ламп было в этот момент почти полностью передано в Москву на МЭЛЗ. С переходом завода «Светлана» на изготовление электронных и ионных ламп были открыты совершенно новые цехи усилительных ламп, специальных электронных ламп (с последующим выделением цеха мощных генераторных ламп), трубок Рентгена, ртутных выпрямителей.

Лаборатория завода «Светлана», существовавшая почти с момента открытия этого завода в 1919 г., получила при этом исключительно большое значение в жизни завода, разрослась, была переведена в специально выстроенный корпус и имела опытного руководителя в лице С. А. Векшинского.

Таким образом, заводу «Светлана» принадлежала ведущая роль в развитии нашей электровакуумной техники, так как, в сущности, все типы приборов, за исключением, пожалуй, лишь металлических ртутных выпрямителей, конструировались, разрабатывались и изготовлялись этим заводом.

Однако, наша возросшая радиопромышленность требовала все бо́льшего и бо́льшего количества ламп, и в 1934 г. под Москвой был пущен новый завод «Радиолампа».

В 1930 г. на заводе «Электросила» открывается отдел ртутных выпрямителей, из которого начинают выходить серии различных типов металлических РВ для электрифицированного транспорта.

Таким образом, непосредственно перед началом Великой Отечественной войны электровакуумная промышленность СССР разрабатывала и выпускала из отечественных материалов все основные типы приборов.

Большую помощь заводам в развитии и освоении электровакуумной техники оказали и оказывают ВЭИ, МЭИ, МГУ в Москве, ЛЭТИ и ЛПИ в Ленинграде.

Ленинградский политехнический институт им. Калинина явился в этом отношении в начальный период восстановления и развития завода «Светлана» основной научно-исследовательской базой. Однако, наряду с научными работниками и инженерами, выпускаемыми ЛПИ, деятельную роль играли и некоторые сотрудники ЛЭТИ: зав. лабораторией завода «Светлана» Г. В. Бондаренко (1920—1927 гг.), консультант завода М. М. Глаголев (1923—1928 гг.) и в несколько более позднее время — консультант завода Б. П. Козырев (1924—1929 гг.). В лаборатории М. М. Глаголева в ЛЭТИ в этот период автором был разработан метод непосредственного определения вакуума в готовых осветительных лампах путем разбивания ламп в определенной арматуре; этот способ широко применялся для выборочного контроля ламп в цехах завода «Светлана» и впоследствии был перенесен на МЭЛЗ; значительную роль при оценке температурного режима работы тела накала осветительных ламп играл разработанный в тот же период способ пирометрирования тончайших накаленных нитей.

Еще более тесная связь и влияние ЛЭТИ на работу завода «Светлана» начались с 1928 г.

Для оценки роли ЛЭТИ в развитии в СССР электровакуумной промышленности целесообразно рассмотреть развитие работ по электровакуумной технике непосредственно в самом ЛЭТИ.

В 1923 г. в ЛЭТИ по инициативе М. М. Глаголева и с участием автора была открыта лаборатория электровакуумной техники, имевшая сначала некоторое тяготение в сторону рентгенотехники, но затем в течение ряда лет оказывавшая содействие радиоспециализации учебными работами по исследованию основных характеристик радиоламп. В 1930 г. было постановлено ввести в ЛЭТИ электровакуумную специальность, и М. М. Глаголев был назначен ее руководителем, но в 1931 г. он отказался от руководства, и заведывание специальностью было передано А. А. Шапошникову, в тот период руководившему отделом радиоприемных ламп на заводе «Светлана».

Первый значительный по контингенту прием в ЛЭТИ на новую электровакуумную специальность был сделан в 1930 г. А. А. Шапошниковым был разработан учебный план, в основу которого был положен принцип, сохранившийся до настоящего времени: необходимость сочетания хороших физико-математических знаний с общей подготовкой инженера-электрика. В связи с постепенным увеличением контингента обучающихся новой специальности и появлением разнообразных узко специальных курсов была увеличена лабораторная база и ряд крупных работников завода «Светлана» был привлечен для чтения лекций по отдельным курсам. Особо большая поддержка ЛЭТИ была оказана С. А. Векшин-

ским, С. А. Зусмановским, А. Г. Александровым, В. И. Волынкиным.

Учебный план электровакуумной специальности содержал два уклона: вакуумный и светотехнический (кафедра светотехники возглавлялась П. М. Тиходеевым). Большая работа по организации в ЛЭТИ рентгенотехнической лаборатории и по постановке преподавания на открытой в дальнейшем кафедре рентгенотехники была выполнена Ф. Н. Хараджа; в связи с этим в течение некоторого времени в период примерно 1936—1939 гг. часть студентов электровакуумной специальности выделялась для подготовки по третьему уклону—рентгенотехническому.

С 1927 г. автором были поставлены в ЛЭТИ исследования по индикаторам радиации, а с 1930 г. читается соответствующий этой специальности курс и ведется дипломное проектирование, перенесенное в дальнейшем в 1944 г. на кафедру основ электровакуумной техники.

С 1935 г. по электровакуумной специальности ЛЭТИ появляются исследовательские работы, выполняемые по заданиям отдельных предприятий и учреждений. К этому моменту, т. е. к середине 30-х годов, электровакуумные приборы в виде радиоламп, тиратронов, фотоэлементов, газотронов и т. д. настолько внедрились во все отрасли техники и стали применяться в столь разнообразных областях промышленности, что появилась необходимость в организации гибко реагирующего на целесообразность разнообразных видоизменений ламп изготовительно-разрабатывающего органа. Электровакуумная лаборатория ЛЭТИ при технической помощи завода «Светлана» явилась именно таким небольшим расчетно-экспериментальным центром, в котором можно было быстро организовать выполнение опытной серии варьированных по параметрам ламп тиратронов, катодных осциллографов, фотоэлементов и т. д. В эти же годы в Электровакуумной лаборатории ЛЭТИ были начаты работы по конструированию ламп СВЧ и анализу явлений в этих лампах, выполнявшиеся Ю. А. Кацманом и в дальнейшем Л. А. Дудник.

Все вышеуказанные работы Электровакуумной лаборатории ЛЭТИ позволили ряду исследовательских институтов СССР и отраслевых лабораторий получить образцы новых конструкций ламп тогда, когда еше эти конструкции не были освоены производством или и не намечались к производству, причем некоторые типы этих новых ламп обусловили возможность создания макетов при разработках заданий оборонного характера.

Кафедры электровакуумной специальности ЛЭТИ быстро оправились от тяжелых последствий второй мировой войны и за период 1944—1946 гг. полностью восстановили учебную и исследовательскую деятельность. В 1946 г. в ЛЭТИ организуется электровакуумный факультет и открываются новые кафедры и лаборатории, выделяющиеся из основной когда-то электровакуумной кафедры. Возникшая в 1941 г. лаборатория, руководимая Ю. А. Кацманом, в конце 1945 г. преобразуется в кафедру и в 1946 г. в специализацию «Радиотехническая электроника»; руководство специализацией «Промышленная электроника» осуществляется А. А. Потсаром. Наконец, в 1947 г. происходит расширение рентгенотехнической лаборатории, а при кафедре основ электровакуумной техники организуются производственные испытания электровакуумных приборов (под руководством Л. А. Дудник).

ЛЭТИ подготовлено много инженеров-электровакуумщиков, выполняющих крупную работу в электровакуумной промышленности. Подготовка новых научно-инженерных кадров, консультации и выполнение научно-исследовательских работ являются разносторонними формами связи ЛЭТИ с промышленностью и научными учреждениями СССР.

Проведенные за последнее время исследования научных работников ЛЭТИ Ф. Н. Хараджа, Б. П. Козырев, Ю. А. Кацман, А. А. Потсар, Л. А. Дудник и др.) представляют определенный вклад в электровакуумную технику и по полученным результатам превосходят зарубежные достижения.

Можно высказать полную уверенность в том, что ЛЭТИ в ближайший период добьется новых существенных достижений в данной области.



Высоковольтная лаборатория им. Смурова

Кандидат техн. наук В. Е. МАНОЙЛОВ

Ленинградский электротехнический институт им. Ульянова (Ленина)

Современная лаборатория высокого напряжения ЛЭТИ, носящая имя А. А. Смурова, возникла из скромной лаборатории электрических линий П. Д. Войнаровского. В 1896 г. П. Д. Войнаровский разработал, а затем впервые в России прочел курс передачи электрической энергии на расстояние. В помощь студентам, изучающим этот курс, и была создана в 1913 г. лаборатория электрических линий. Лаборатория имела 2 трансформатора по 100 kVA и вспомогательное оборудование и занимала небольшое помещение в первом этаже. До сих пор над дверью сохранилась медная дощечка — «Лаборатория электрических линий».

А. А. Смуров—молодой талантливый инженер, оставленный при институте, занимался в лаборатории вопросами высокого напряжения. Глубокое знание физики и математики, полученное А. А. Смуровым в университете, который он окончил до поступления в Электротехнический институт, позволило ему сразу же занять ведущую роль в исследовании этих вопросов.

В 1920 г. по инициативе и при непосредственном участии А. А. Смурова лаборатория электрических линий была преобразована в первую в России специальную лабораторию высоковольтной техники.

Из крупных работ, выполненных лабораторией в это время, особый интерес представляет работа по исследованию 35-kV кабеля, по методике расчета электрического поля, по исследованию высоковольтных изоляторов.

Работы, выполненные в лаборатории, в значительной степени помогли решить ряд сложных технических вопросов, возникших при проектировании и строительстве Волховской и Шатурской электростанций.

В 1925 г. оборудование лаборатории пополнилось каскадом трансформаторов на 375 kV по отношению к земле.

Одновременно с участием в научно-исследовательских работах А. А. Смуров работал над составлением первого в СССР учебника по технике высокого напряжения и передаче электрической энергии, который вышел в 1922 г. в объеме 29 печатных листов под названием «Электротехника высокого напряжения».

По инициативе А. А. Смурова и при участии его ближайших помощников и учеников К. С. Архангельского, Е. Г. Богдановича, Г. М. Коновалова, Н. Н. Белянинова и др. началось строительство нового здания для лаборатории. В 1930 г. строительство было закончено, и в лаборатории было установлено новейшее оборудование: большой каскад трансформаторов на 1 050 kV по отношению к земле, малый каскад в 375 kV, мост Шерринга, потенциометр Тинслея и др. По размеру высоковольтного зала и установленному в нем оборудованию лаборатория ЛЭТИ заняла первое место в СССР и одно из первых мест среди подобных лабораторий в Европе.

В жизни лаборатории начался новый этап. Сочетание широкого кругозора ученого с глубокой инженерной эрудицией позволило А. А. Смурову сразу развернуть весь многообразный и сложный комплекс работ, связанных с решением проблем передачи и распределения электрической энергии.

В течение первого года существования новой лаборатории в ней были организованы отделения: 1) высокого напряжения; 2) катодной осциллографии; 3) релейной защиты и автоматики; 4) аппаратное; 5) устойчивости; 6) физико-химическое.

Из работ этого периода следует отметить: исследование, связанное с постройкой трансформаторов на 380 kV, исследование изоляторов для Свирской линии передачи 220 kV, разработка схемы для испытания витковой изоляции машин, исследование сложных схем релейной защиты, сооружение модели линии передачи и др.

По объему работ и по обширности тематики лаборатория, по существу, переросла в специальный научно-исследовательский институт, а отделения ее превратились в самостоятельные лаборатории. Под руководством А. А. Смурова отделения решают комплексные работы, связанные с передачей и распределением электроэнергии высокого напряжения.

Сотрудники лаборатории К. С. Архангельский, Л. Е. Машкиллейсон, Г. М. Коновалов, Н. Н. Белянинов, Е. С. Богданович проводят большую работу по исследованию высоковольтной изоляции. Мощное оборудование для исследования изоляции на промышленной частоте дополняется импульсным генератором на 3 200 kV, изготовленным по проекту лаборатории проф. А. А. Смурова. Это сделало возможным всестороннее изучение изоляции, что является, безусловно, необходимым в период создания крупных энергетических станций и подстанций и строительства линий передачи на 110, 220 и 380 kV.

Лаборатория пополнилась новыми сотрудниками — М. М. Некрасовым, Л. И. Хмельницким, С. Л. Зайенцем, Г. Я. Муравьевой и др.

За 10 предвоенных лет в лаборатории по высоковольтному отделению под руководством А. А. Горева была проделана большая творческая работа. Проведено изучение и апробация элементов изоляции для вновь построенных объектов энергосистем, выполнены исследования, необходимые для составления проектов защиты от перенапряжений. В лаборатории ведется большая научно-исследовательская работа над методами определения импульсных характеристик, методами повышения прочности изоляции, методами борьбы со скользящими разрядами, работа по исследованию на моделях схем защиты от пе-

ренапряжений и т. д. Результаты этих работ используются энергосистемами и заводами «Электросила», «Электроаппарат», «Пролетарий» и др., с которыми лаборатория непосредственно связана.

С 1932 г. началась разработка проектов защиты энергосистем от перенапряжений. Для экспериментального изучения величины и характера перенапряжений в самом грозовом районе Союза—Донбассе были созданы передвижные катодно-осциллографические лаборатории, работавшие в течение грозового сезона 1933 г. Эти лаборатории были оборудованы катодными осциллографами, конструкция которых разработана в лаборатории инж. Е. С. Богдановичем и которые являются первыми катодными осциллографами в Союзе и за границей.

Проекты защиты от перенапряжений были выполнены в 1933—1934 гг. под общим руководством А. А. Горева применительно к системам Донэнерго и Уралэнерго. В разработке проектов принимали участие А. М. Залесский, доц. Л. Е. Машкиллейсон, К. С. Архангельский и др.

К выполнению рабочих проектов защиты от перенапряжений привлекались инженеры соответствующих энергосистем. В лаборатории были созданы для них курсы повышения квалификации по вопросам высоковольтной техники, защиты от перенапряжений и пр.

В 1935—1937 гг. проекты защиты от перенапряжений были выполнены для Ярэнерго, Киевэнерго, Харэнерго и других энергосистем.

Группой контроля изоляции, ведущее положение в которой занимали К. С. Архангельский и Е. С. Богданович, разработан ряд методов и ряд оригинальных приборов для эксплоатационного контроля изоляции.

Смонтированные в специальных автобусах передвижные лаборатории, изготовленные в лаборатории им. Смурова, можно встретить во многих энергосистемах СССР. Эти лаборатории впервые позволили наладить планово-профилактические испытания изоляции оборудования.

В период с 1929 по 1935 г. вышли из печати три части капитального труда А. А. Смурова под названием «Электротехника высоких напряжений и передача электрической энергии», написанные на базе многочисленных исследований, проведенных в лаборатории, и при участии Л. Е. Машкиллейсона, Г. Г. Швеца, А. В. Трамбицкого, П. Н. Горшкова, И. С. Ароновича, В. Б. Романовского и др.

С 1927 г. лаборатория А. А. Смурова начала работать в области релейной защиты (В. И. Иванов и П. И. Рыжов). В 1930 г. началась самостоятельная деятельность релейной лаборатории, и в 1932 г. в отделении защиты уже работали под руководством П. И. Рыжова 27 чел.: В. И. Иванов, В. Т. Григорьев, В. Е. Манойлов, Н. П. Поташев, Р. С. Зурабов, В. Ю. Гессен, В. В. Волков и др.

Следует отметить роль лаборатории в подготовке кадров по релейной защите. Организованные еще в 1931 г. по инициативе П. И. Рыжова Всесоюзные курсы по специализации релейной защиты подготовили на базе лаборатории не один десяток специалистов, ныне успешно работающих в релейных службах энергосистем Министерства электростанций.

Электроаппаратное отделение лаборатории им. Смурова организовалось в 1929 г. Общее руководство отделением осуществлялось А. А. Смуровым.

Проблема устойчивости официально возникла в 1930 г., хотя уже задолго до этого А. А. Смуровым и его учениками в этой области велась большая работа. Вот почему при оформлении в 1931 г. самостоятельного отделения устойчивости сразу была развернута большая работа, в которой принимали участие А. А. Вульф, В. Н. Касьянов, Н. Н. Щедрин и научные сотрудники Л. С. Боровский, С. Н. Анисимов, А. С. Еремеев, Н. Н. Кондрашев, М. Н. Грибанов, С. В. Усов, М. М. Ботвинник.

Из крупных научно-исследовательских работ в этой области следует отметить: 1) изучение устойчивости параллельной работы станций и уточнение расчетов проф. А. А. Смурова — работа выполнялась А. А. Смуровым, С. Н. Анисимовым, В. С. Толчковым и С. С. Добротворским; 2) регулятор Тириля и влияние его на устойчивость — исполнители: А. А. Горев, А. А. Вульф, В. С. Толчков; 3) вычисление движения ротора синхронных машин при переходе от одного установившегося режима к другому и экспериментальная проверка расчетов — А. А. Горев и С. Н. Анисимов.

Особенно ценной является созданная в лаборатории по предложению А. А. Смурова специальная универсальная модель с вращающимися машинами для изучения устойчивости. Непосредственный руководитель работы — С. Н. Анисимов.

Физико-химическое отделение лаборатории занималось исследованием старения и органических изменений в изоляции и в маслах, а также разработкой методов восстановления масел. В этих работах принимали участие М. В. Курлин, К. Н. Краснокутский и др.

Трудно в короткой статье дать даже вкратце характеристику многообразных работ лаборатории им. Смурова. Деятельность и жизнь лаборатории неразрывно связаны с разрешением теоретических и практических задач, возникавших и возникающих перед советской энергетикой в области высоковольтной электротехники и передачи электроэнергии на расстояние.

8 апреля 1937 г. умер А. А. Смуров. Страна потеряла выдающегося передового ученого новатора, а коллектив лаборатории лишился замечательного руководителя. Созданная А. А. Смуровым лаборатория продолжает успешно работать над задачами большого научного и практического значения.

◇ ◇ ◇

Применение метода аналогии для выбора электродвигателя по нагреву при переменной нагрузке

Доктор техн. наук, проф. **С. А. РИНКЕВИЧ**

Ленинградский электротехнический институт им. Ульянова (Ленина)

Установление аналогии между переходными процессами в цепях переменного тока и процессами нагрева электрических машин позволяет перенести расчетный аппарат теории переменного тока в область тепловых расчетов. Предлагаемый метод вскрывает неточности существующих методов расчета в отношении распределения максимумов и минимумов температуры во времени и наглядно освещает влияние тепловых параметров двигателя и частоты изменения нагрузки на форму кривой и величину температуры двигателя.

Введение. При проектировании электропривода любого исполнительного механизма одним из основных вопросов является выбор мощности двигателя. Если исполнительный механизм работает на постоянную и длительную нагрузку, то вопрос решается просто: мощность двигателя берется равной мощности, потребляемой исполнительным механизмом, с учетом, конечно, потерь в передачах в самом механизме. Если же исполнительный механизм имеет прерывистый график нагрузки, то выбор мощности двигателя усложняется.

В этом случае в соответствии с графиком нагрузки двигателя проектируемого электропривода строится по кривой к. п. д. график потерь двигателя. Зная теплоемкость и теплоотдачу двигателя предварительно выбранной мощности, строят кривую изменения его температуры. Если наивысшая температура, достигаемая двигателем, оказывается близкой к наибольшей температуре, допускаемой существующими нормами, то данный двигатель и берется для привода; если же наибольшая температура сильно отличается в ту или другую сторону от допускаемой нормами температуры, то «пробуется» другой двигатель — с другой теплоемкостью и теплоотдачей, соответственно большей или меньшей мощности.

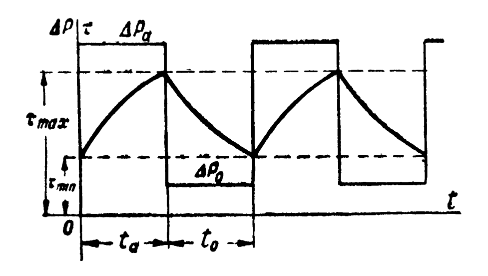


Рис. 1.

Построение графика изменения температуры двигателя ведется при этом следующим образом. Положим, что график потерь в двигателе имеет вид, представленный на рис. 1, где ΔP — потери в W, а t — время в sec. Составим приближенное уравнение теплового равновесия двигателя:

$$\Delta P_a\,dt = C\,d\tau + A\tau\,dt, \tag{1}$$

где C — теплоемкость двигателя в J/°C;

τ — превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды в °C;

A — теплоотдача двигателя в J/°C sec. Интегрируя уравнение (1), находим:

$$\tau = \frac{\Delta P_a}{A} + Ke^{-\frac{t}{T}}, \tag{1a}$$

где K — произвольная постоянная интегрирования, определяемая по начальным условиям;

$T = \frac{C}{A}$ — постоянная времени нагрева двигателя в sec.

Предполагая, что тепловой режим уже установился так, что колебания температуры обусловлены исключительно колебаниями нагрузки, считаем наинизшую температуру в начале наибольшей нагрузки и равной τ_{min}, а наивысшую — температуру в начале наименьшей нагрузки и равной τ_{max}. Тогда из (1а) следует:

$$\tau = \tau_{min}\,e^{-\frac{t}{T}} + \frac{\Delta P_a}{A}\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right).$$



Так как по предположению тепловой режим установился, то должно быть $\tau=\tau_{max}$ при $t=t_a$; следовательно,

$$\tau_{max}=\tau_{min}\,e^{-\frac{t_a}{T}}+\frac{\Delta P_a}{A}\left(1-e^{-\frac{t_a}{T}}\right). \quad (2)$$

Это равенство сохраняет силу и для промежутка времени работы двигателя с пониженной нагрузкой, если заменить t_a на t_0, ΔP_a на ΔP_0 и взаимно обменять местами τ_{max} и τ_{min}, что дает:

$$\tau_{min}=\tau_{max}\,e^{-\frac{t_0}{T}}+\frac{\Delta P_0}{A}\left(1-e^{-\frac{t_0}{T}}\right). \quad (3)$$

Из системы уравнений (2) и (3) можно определить τ_{max} и τ_{min}:

$$\tau_{max}=\frac{\frac{\Delta P_a}{A}\left(1-e^{-\frac{t_a}{T}}\right)+\frac{\Delta P_0}{A}\left(1-e^{-\frac{t_0}{T}}\right)e^{-\frac{t_a}{T}}}{1-e^{-\frac{T_s}{T}}}, \quad (4)$$

$$\tau_{min}=\frac{\frac{\Delta P_0}{A}\left(1-e^{-\frac{t_0}{T}}\right)+\frac{\Delta P_a}{A}\left(1-e^{-\frac{t_a}{T}}\right)e^{-\frac{t_0}{T}}}{1-e^{-\frac{T_s}{T}}}, \quad (5)$$

где обозначено $t_a+t_0=T_s$.

Таким образом, применяя этот метод определения наибольшей и наименьшей температуры двигателя, мы фактически заранее намечали процесс ее изменения в смысле расположения максимумов и минимумов и по намеченной кривой температуры определяли произвольно постоянные интегрирования. В действительности же, как будет показано ниже, соотношение численных значений величин C и A существенным образом влияет на расположение максимумов и минимумов температуры. Поэтому изложенный метод определения τ_{max}, τ_{min} следует признать не вполне точным.

Вторым недостатком этого метода является то, что он представляет большие затруднения для определения процесса изменения температуры двигателя непосредственно вслед за вступлением его в работу, когда тепловой режим еще не установился. Предлагаемый метод, во-первых, лишен указанных недостатков, а во вторых, он вскрывает физическую сущность влияния тепловых параметров двигателей C и A на процесс изменения его температуры.

Исследование процессов нагрева и охлаждения двигателя при установившемся режиме. Предлагаемый метод основан на применении теории рядов и интегралов Фурье, имеющих широкое применение в прикладной электротехнике.

Поместив начало координат в середине промежутка времени, соответствующего бо́льшим потерям в двигателе, разлагаем периодический график потерь в ряд Фурье:

$$\Delta P=\Delta P_m+\sum\left(M_n\sin n\frac{2\pi}{T_s}t+N_n\cos n\frac{2\pi}{T_s}t\right), \quad (6)$$

где по известным формулам Эйлера

$$\Delta P_m=\frac{1}{2\pi}\int_{2\pi}^{2\pi}\Delta P d\,\frac{2\pi}{T_s}t=\frac{\Delta P_0 t_0+\Delta P_a t_a}{T_s},$$

$$M_n=\frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi}\Delta P\sin n\frac{2\pi}{T_s}t d\frac{2\pi}{T_s}t=0 \quad \text{(для данного случая симметричной кривой)},$$

$$N_n=\frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi}\Delta P\cos n\frac{2\pi}{T_s}t d\frac{2\pi}{T_s}t=$$

$$=(-1)^{n+1}\frac{2}{\pi n}(\Delta P_a-\Delta P_0)\sin n\pi\frac{t_0}{T_s}.$$

Следовательно, представив ряд Фурье (6) в форме

$$\Delta P=\Delta P_m+\sum\Delta P_n\cos\left(n\frac{2\pi}{T_s}t+\alpha_n\right), \quad (6')$$

где α_n — начальная фаза, равная нулю в данном случае симметричной формы кривой, находим для рассматриваемого случая

$$\Delta P_m=\frac{\Delta P_0 t_0+\Delta P_a t_a}{T_s};$$

$$\Delta P_n=\sqrt{M^2+N^2}=(-1)^{n+1}\frac{2}{\pi n}(\Delta P_a-\Delta P_0)\sin n\pi\frac{t_0}{T_s};$$

$$\operatorname{tg}\alpha_n=\frac{M_n}{N_n}=0.$$

Для более сложного графика нагрузки, например с учетом увеличения ее при пусках электропривода, иначе говоря, для случая несимметричной кривой, коэффициент M_n не равен нулю, так же как и начальная фаза α_n.

Таким образом, вопрос об определении температуры двигателя сводится в данном случае к решению дифференциального уравнения первого порядка, линейного с постоянными коэффициентами и свободным членом:

$$C\frac{d\tau}{dt}+A\tau=\Delta P_m+\sum\Delta P_n\cos n\frac{2\pi}{T_s}t. \quad (7)$$

Сравнивая это уравнение с известным уравнением теории переменных токов

$$L\frac{di}{dt}+Ri=U_m+\sum U_n\cos n\frac{2\pi}{T}t, \quad (8)$$

составленным для цепи, содержащей в последовательном соединении индуктивность с коэффициентом самоиндукции L и активное сопротивление R, находящейся под действием напряжения сложной формы, разложенного в соответствующий ряд Фурье, замечаем, что в процессе нагрева двигателя его теплоемкость играет роль коэффициента самоиндукции, а теплоотдача — роль активного сопротивления.

Предлагаемая аналогия идет значительно дальше чисто формальной стороны сходства уравнений. В самом деле, из теории переменных токов известно, что активное сопротивление превращает электрическую энергию в тепловую, а последнюю рассеивает в окружающую среду. Подобно этому теплоотдача двигателя A рассеивает его тепловую энергию. Приемник с самоиндукцией при прохождении по нему переменного тока накапливает энергию в магнитном поле при возрастании тока и возвращает эту энергию при убывании. Точно так же теплоемкость C накапливает энергию теплового поля по мере нарастания температуры и расходует эту энергию при убывании.

Как известно из теории переменных токов, решение уравнения (8), соответствующее вынужденному току установившегося режима, имеет вид:

$$i=\frac{U_m}{R}+\sum\frac{U_n}{\sqrt{R^2+\left(n\frac{2\pi}{T}L\right)^2}}\cos\left(n\frac{2\pi}{T}t-\varphi_n\right),$$

где

$$\operatorname{tg} \varphi_n = \frac{n \frac{2\pi}{T} L}{R}.$$

Подобно этому решение уравнения (7), соответствующее „вынужденной" температуре установившегося режима, очевидно, будет иметь вид:

$$\tau = \frac{\Delta P_m}{A} + \sum \frac{\Delta P_m}{\sqrt{A^2 + \left(n \frac{2\pi}{T_s} C\right)^2}} \cos\left(n \frac{2\pi}{T_s} t - \varphi_n\right), \qquad (9)$$

где

$$\operatorname{tg} \varphi_n = \frac{n \frac{2\pi}{T_s} C}{A}.$$

Отсюда следует, что температура не совпадает по фазе во времени с нагрузкой двигателя, а отстает от нее на некоторый угол, тангенс которого пропорционален теплоемкости двигателя и частоте чередования максимумов и минимумов нагрузки и обратно пропорционален теплоотдаче двигателя.

На рис. 2 представлены первая гармоника ряда Фурье потерь и первая гармоника ряда Фурье температуры, сдвинутая относительно первой по фазе на угол φ_1. Для наглядности масштаб температуры и потерь на рисунке подобран так, чтобы значения ΔP_m и $\tau_m = \frac{\Delta P_m}{A}$ были расположены над осью абсцисс на одинаковой высоте.

Изображая гармонические составляющие потерь и температуры, как в переменном токе, — в виде условных „временных" векторов, получим „треугольник потерь" для n-ной гармоники, представленный на рис. 3, где расход тепла на рассеяние соответствует падению напряжения в активном сопротивлении цепи переменного тока, а расход тепла на теплоемкость двигателя соответствует падению напряжения в реактивном сопротивлении. Таким образом, эти два расхода тепла представляют собой ортогональную систему, так что выражение любой гармонической составляющей потерь может быть представлено в следующем виде:

$$\Delta P = \Delta P_n \cos n \frac{2\pi}{T_s} t = A \tau_n \cos\left(n \frac{2\pi}{T_s} t - \varphi_n\right) + $$
$$+ n \frac{2\pi}{T_s} C \tau_n \cos\left(n \frac{2\pi}{T_s} t - \varphi_n + \frac{\pi}{2}\right).$$

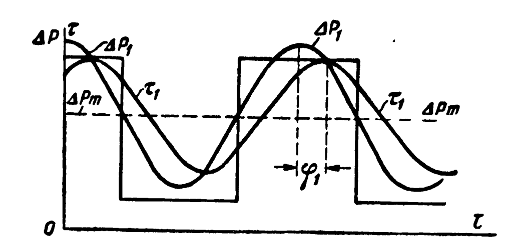


Рис. 2.

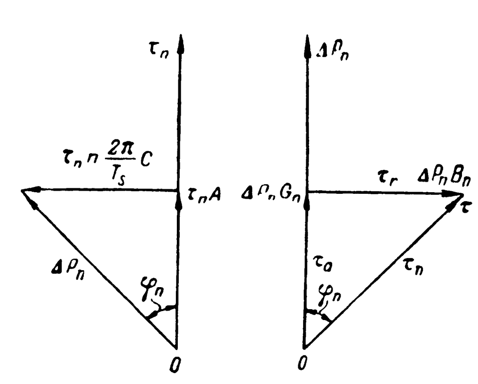


Рис. 3. Рис. 4.

Легко видеть, что составляющие потерь теплорассеивающая и теплоемкостная удовлетворяют соотношению

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} \Delta P_{nA} \, \Delta P_{nC} \, dt = 0,$$

где

$$\Delta P_{nA} = A \tau_n \cos\left(n \frac{2\pi}{T_s} t - \varphi_n\right)$$

— рассеивающая составляющая, а

$$\Delta P_{nC} = n \frac{2\pi}{T_s} C \tau_n \cos\left(n \frac{2\pi}{T_s} t - \varphi_n + \frac{\pi}{2}\right)$$

— емкостная составляющая.

В том случае, когда график потерь достаточно точно может быть представлен в двухчленной форме

$$\Delta P = \Delta P_m + \Delta P_1 \cos \frac{2\pi}{T_s} t,$$

наибольшая температура определяется как сумма

$$\tau_{\max} = \tau_m + \tau_1,$$

где

$$\tau_m = \frac{\Delta P_m}{A}; \qquad \tau_1 = \frac{\Delta P_1}{\sqrt{A^2 + \left(\frac{2\pi}{T_s} C\right)^2}}. \qquad (10)$$

Если же график потерь в соответствии с требованиями точности требует для своего представления нескольких членов ряда Фурье, можно прибегнуть для приближенного определения $\tau_{\max}$ к методу ортогонализации составляющих температуры, основанному на „треугольнике температур", который легко может быть получен из треугольника потерь (рис. 3). В самом деле, опуская перпендикуляр из конца вектора τ_n на вектор ΔP_n (рис. 4) и вычисляя катеты полученного таким образом прямоугольного треугольника, находим:

$$\tau_n \cos \varphi_n = \frac{\Delta P_n A}{A^2 + \left(n \frac{2\pi}{T_s} C\right)^2},$$

$$\tau_n \sin \varphi_n = \frac{\Delta P_n \, n \frac{2\pi}{T_s} C}{A^2 + \left(n \frac{2\pi}{T_s} C\right)^2}.$$

На рис. 4, в соответствии с теорией переменных токов введены следующие обозначения: теплорассеивающая проводимость

$$G_n = \frac{A}{A^2 + \left(n \frac{2\pi}{T_s} C\right)^2};$$

тепловоспринимающая проводимость

$$B_n = \frac{n \frac{2\pi}{T_s} C}{A^2 + \left(n \frac{2\pi}{T_s} C\right)^2}.$$

Таким образом, всякую гармоническую составляющую температуры можно в свою очередь разложить на две составляющих

$$\tau_n = \tau_{nG} + \tau_{nB} = \Delta P_n G_n \cos n \frac{2\pi}{T_s} t + \Delta P_n B_n \cos\left(n \frac{2\pi}{T_s} t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Ортогональные составляющие τ_{nG} и τ_{nB}, очевидно удовлетворяют соотношению:

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} \tau_{nG} \, \tau_{nB} \, dt = 0.$$

Пользуясь этим соотношением, можем построить треугольник типа рис. 4 и для произвольного вида графика потерь.

Положим, что зависимость потерь от времени изображается в виде:

$$\Delta P(t) = \Delta P_m + \Delta P_v(t),$$

где

$\Delta P_m = \frac{1}{T_s}\int_0^{T_s} \Delta P(t)\, dt$ — среднее значение потерь за период, представляющее собой постоянную составляющую ΔP_m;

$\Delta P_v(t) = \Delta P(t) - \Delta P_m$ — чисто переменная составляющая потерь, удовлетворяющая условию

$$\frac{1}{T_s}\int_0^{T_s} \Delta P_v(t)\, dt = 0.$$

Тогда зависимость температуры τ от времени t можно также представить в форме

$$\tau(t) = \tau_m + \tau_v(t),$$

причем $\tau_m = \frac{1}{T_s}\int_0^{T_s} \tau\, dt$ — постоянная составляющая температуры;

$\tau_v(t) = \tau(t) - \tau_m$ — чисто переменная составляющая, удовлетворяющая условию

$$\frac{1}{T_s}\int_0^{T_s} \tau_v(t)\, dt = 0.$$

При этом постоянные составляющие ΔP_m и τ_m, очевидно, связаны соотношением

$$\tau_m = \frac{\Delta P_m}{A}.$$

Чисто переменную составляющую температуры $\tau_v(t)$ можно разложить в свою очередь на две ортогональные составляющие известным методом ортогонализации.

Обозначим через Q постоянное количество, удовлетворяющее условию

$$Q = \frac{\frac{1}{T_s}\int_0^{T_s} \tau_v \Delta P_v\, dt}{\frac{1}{T_s}\int_0^{T_s} \Delta P_v dt}, \tag{11}$$

и представим выражение τ_v в форме

$$\tau_v = Q\Delta P_v + \tau_r,$$

где

$$\tau_r = \tau_v - Q\Delta P_v.$$

Умножая обе части предыдущего равенства на $\Delta P_v dt$, интегрируя в пределах от 0 до T_s, на основании соотношения (11) получим:

$$\frac{1}{T_s}\int_0^{T_s} \tau_r \Delta P_v dt = 0.$$

Следовательно, обозначив $Q\Delta P_v = \tau_a$, найдем:

$$\frac{1}{T_s}\int_0^{T_s} \tau_a \tau_r dt = 0. \tag{12}$$

Таким образом, чисто переменная часть температуры в самом общем случае раскладывается на две ортогональные составляющие, из которых одна коаксиальна по отношению к ΔP_v, а вторая ортогональна к ней. Нетрудно показать, что в этом случае „действующие" значения составляющих τ_a и τ_r могут быть представлены как катеты прямоугольного треугольника, гипотенузой которого является „действующее" значение всей переменной температуры.

В самом деле, возводя в квадрат обе части равенства $\tau_v = \tau_a + \tau_r$ и определяя средние значения за период T_s, получаем:

$$\frac{1}{T_s}\int_0^{T_s} \tau^2_v dt = \frac{1}{T_s}\int_0^{T_s} \tau^2_a dt + \frac{1}{T_s}\int_0^{T_s} \tau^2_r dt + 2\,\frac{1}{T_s}\int_0^{T_s} \tau_a \tau_r dt$$

или на основании (12)

$$\tau^2_{ve} = \tau^2_{ae} + \tau^2_{re}, \tag{13}$$

где индексом e обозначено действующее значение:

$$\tau_e = \sqrt{\frac{1}{T_s}\int_0^{T_s} \tau^2 dt}.$$

С другой стороны,

$$\tau_{ae} = \sqrt{\frac{1}{T_s}\int_0^{T_s} \tau^2_a dt} = \sqrt{\frac{1}{T_s}\int_0^{T_s} Q^2 \Delta P^2_v} = Q\Delta P_{ve}.$$

Обозначив, кроме того,

$$B = \frac{\tau_{re}}{\Delta P_{ve}},$$

получаем в общем случае треугольник, подобный представленному на рис. 4, так как

$$\tau^2_{ve} = (Q\Delta P_{vc})^2 + (B\Delta P_{ve})^2.$$

Таким образом, в общем случае можно приближенно принять для амплитуды

$$\tau_{\max} = \tau_m + \tau_{ve}\sqrt{2}. \tag{14}$$

С другой стороны, если τ_v представить в виде ряда Фурье

$$\tau_v = \sum \tau_n \cos\left(n\frac{2\pi}{T_s}t + \alpha_n\right),$$

то

$$\tau_{ve} = \sqrt{\Sigma \tau^2_{ne}}, \tag{15}$$

т. е. действующее значение всей переменной части температуры равно корню квадратному из суммы квадратов действующих значений ее гармонических составляющих.

Составление τ_{ve} из τ_{ne} может быть произведено графическим методом, указанным на рис. 5 для случая пяти гармоник.

Продолжая дальше аналогию между теорией переменных токов и нагрева двигателя, можно легко показать, что если потери в двигателе достаточно точно изображаются двухчленной формулой

$$\Delta P = \Delta P_m + \Delta P_1 \cos\left(\frac{2\pi}{T_s}t + \alpha_1\right),$$

то с изменением тепловых параметров двигателя A или C конец вектора τ будет вычерчивать окружность (рис. 6). В самом деле, построив векторную диаграмму и ΔP_1 для произвольного значения параметров A и C, восстановим в конце вектора τ_1 перпендикуляр и продолжим его до пересечения с осью ΔP_1 и осью к ней, перпендикулярной в точках L и M. Из прямоугольного треугольника ONM находим:

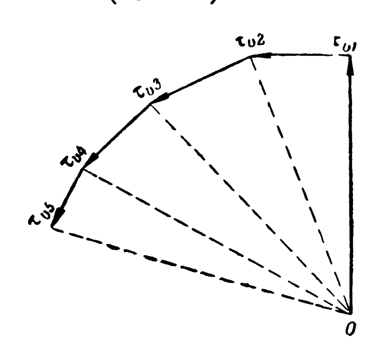


Рис. 5.

$$\overline{OM} = \frac{\overline{ON}}{\sin\varphi_1} = \frac{\Delta P_1}{\frac{2\pi}{T_s}C} \quad \text{(не зависит от } A\text{)},$$

а из треугольника ONL получаем:

$$\overline{OL} = \frac{\overline{ON}}{\cos\varphi_1} = \frac{\Delta P_1}{A} \quad \text{(не зависит от } C\text{)}.$$

Таким образом, при изменении одного только пара-

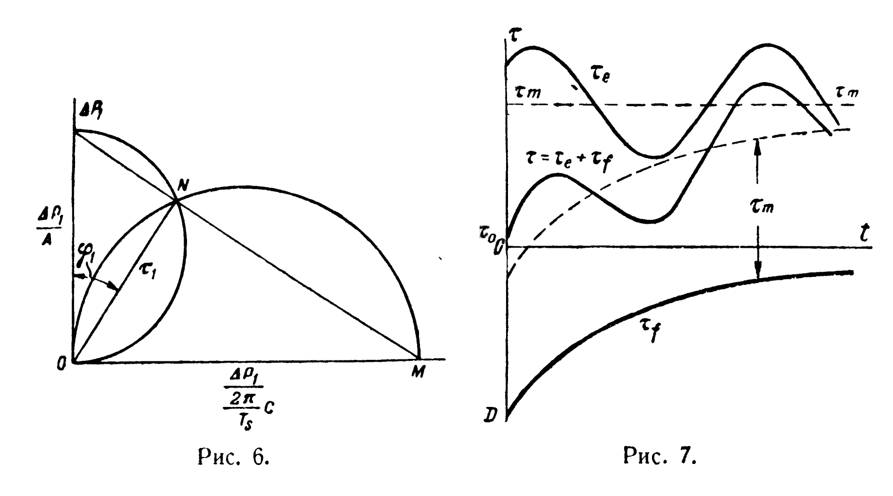


Рис. 6. Рис. 7.

метра A отрезок OM всегда будет виден из конца вектора τ_1 под прямым углом. Отсюда следует, что с изменением A (например, при усилении обдувания двигателя) температура τ_1 изменяется таким образом, что конец вектора τ_1 скользит по окружности, у которой $OM=\dfrac{\Delta P_1}{\frac{2\pi}{T_s}C}$ служит диаметром. Подобным же образом можно показать, что OL не зависит от C. Следовательно, при изменении одного только этого параметра температура τ_1 должна изменяться так, чтобы отрезок OL всегда был виден из конца вектора τ_1 под прямым углом, т. е конец должен скользить по окружности, у которой OL служит диаметром.

Нагрев и охлаждение электродвигателя при неустановившемся режиме. Выражение (9) является частным интегралом линейного уравнения (7), соответствующим установившемуся типовому режиму делителя, и для определения закона изменения температуры в переходный период достаточно, следовательно, к выражению (9) добавить общее решение уравнения без свободного члена:

$$\tau=De^{-\frac{A}{C}t}=De^{-\frac{t}{T}},\qquad(16)$$

где D — произвольная постоянная интегрирования, определяемая из начальных условий.]

Если в общем случае

$$\Delta P=\Delta P_m+\sum\Delta P_n\cos\left(n\frac{2\pi}{T_s}t+\alpha_n\right),$$

то общее решение уравнения (7) будет:

$$\tau=\frac{\Delta P_m}{A}+\sum\frac{\Delta P_n}{\sqrt{A^2+\left(n\frac{2\pi}{T_s}C\right)^2}}\times$$

$$\times\cos\left(n\frac{2\pi}{T_s}t+\alpha_n-\varphi_n\right)+De^{-\frac{t}{T}}.$$

Предполагая, что в начале работы температура двигателя была на τ_0 выше температуры окружающей среды, получаем $\tau=\tau_0$ при $t=0$. Это условие дает:

$$D=\tau_0-\frac{\Delta P_m}{A}-\sum\frac{\Delta P_n}{\sqrt{A^2+(n\frac{2\pi}{T_s}C)}}\cos(\alpha_n-\varphi_n).$$

Таким образом, общее выражение для температуры двигателя при неустановившемся режиме будет иметь вид:

$$\tau=\frac{\Delta P_m}{A}+\sum\frac{\Delta P_n}{\sqrt{A^2+\left(n\frac{2\pi}{T_s}C\right)^2}}\cos\left(n\frac{2\pi}{T_s}t+\alpha_n-\varphi_n\right)+$$

$$+\left[\tau_0-\frac{\Delta P_m}{A}-\sum\frac{\Delta P_n}{\sqrt{A^2+\left(n\frac{2\pi}{T_s}C\right)^2}}\cos(\alpha_n-\varphi_n)\right]e^{-\frac{t}{T}}.\qquad(17)$$

Уравнение (16) не содержит потери в двигателе, обусловливающие его нагрев, а лишь тепловые параметры, и естественно назвать решение (17) уравнения (16) по аналогии с переменным током „свободной" температурой, а решение (9) уравнения (7) — „вынужденной" температурой двигателя, так как она определяется внешними условиями—потерями в двигателе. Тогда можно сказать, что в переходный период температура двигателя складывается из вынужденной и свободной, асимптотически стремящейся со временем к нулю. На рис. 7 представлен процесс изменения температуры двигателя в переходный период, когда переменная составляющая потерь состоит только из одной первой гармоники.

Кратковременная нагрузка электродвигателя. Изложенный метод выбора двигателя по мощности в отношении нагрева естественным образом ограничивается областью применимости рядов Фурье, т. е. случаем кривых потерь, удовлетворяющих „условиям Дирихле", и, кроме того, периодических или квази-периодических, для которых может быть установлена частота первой гармоники. Строго говоря, только этот случай предусматривается и „старым" методом, так как при отсутствии периодичности теряет смысл понятие „установившегося" режима и мы лишаемся методики определения произвольных постоянных интегрирования, изложенной во введении.

Для случая кратковременной нагрузки, когда установление периода, а следовательно, и частоты первой гармоники оказывается невозможным, можно вместо ряда Фурье использовать „метод двойного интеграла Фурье", применяемый в теории переменных токов для определения тока в цепи, когда напряжение на ее зажимах имеет характер импульсов.

Как известно, всякая кривая $\Delta P(t)$, удовлетворяющая условиям Дирихле и еще дополнительному условию $\int\limits_{-\infty}^{+\infty}\Delta P(t)\,dt$ — конечное число, может быть представлена в форме двойного интеграла Фурье

$$\Delta P(t)=\frac{1}{2\pi}\int\limits_{-\infty}^{+\infty}e^{j\omega t}d\omega\int\limits_{-\infty}^{+\infty}e^{-j\omega t}\Delta P(t)\,d\tau.\qquad(18)$$

В рассматриваемом случае при исследовании нагрева электродвигателя от кратковременной нагрузки д полнительное условие может быть смягчено. Как было найдено при рассмотрении переходных процессов, затухание свободной температуры наступает по истечении времени $3T=3\dfrac{C}{A}$. Поэтому дополнительное условие можно представить в форме $\int\limits_0^{3T}\Delta P(t)\,dt$ — конечная величина.

В уравнении (18) выражение

$$\Delta\hat{P}(\omega)=\frac{1}{\pi}\int\limits_{-\infty}^{+\infty}e^{-j\omega t}\Delta P(\tau)\,dt\qquad(19)$$

может быть названо „частотным спектром потерь". Очевидно, что выражение $\Delta\hat{P}(\omega)$ по вычислении интеграла представится в форме комплексного числа

$$\Delta\hat{P}(\omega)=\Delta P(\omega)\,\varepsilon^{j\psi(\omega)}.\qquad(19')$$

При этом Mod $\Delta\hat{P}(\omega)=\Delta P(\omega)$ назовем „частотным спектром амплитуд", а Arg $\Delta\hat{P}(\omega)=\psi(\omega)$ —„частотным спектром начальных фаз". Если ряд Фурье дает представление искомой функции в форме линейчатого прерывистого спектра кратных по частоте гармонических колебаний, то частотный спектр интеграла Фурье является спектром непрерывным. Рассмотрим случай графика рис. 1. В этом случае

$$\Delta\hat{P}(\omega)=\frac{1}{\pi}\int\limits_0^{t_a}\Delta P_a\,e^{-j\omega t}\,d\tau,$$

т. е.

$$\Delta P(\omega)=\frac{\Delta P_a}{\pi\omega}\sqrt{\sin^2\omega t_a+(1-\cos t_a)^2}=\frac{2\Delta P_a}{\pi\omega}\sin\frac{\omega t_a}{2},$$

$$\operatorname{tg}\psi(\omega)=-\frac{1-\cos\omega t_a}{\sin\omega t_a}=\operatorname{tg}\left(\pi-\frac{\omega t_a}{2}\right)$$

и, следовательно, $\psi(\omega)=\pi-\frac{\omega t_a}{2}$.

Итак, с введением понятия о частотном спектре уравнение (18) может быть переписано в следующем виде:

$$\Delta P(t)=\frac{1}{2}\int_{-\infty}^{+\infty}\Delta P(\omega)\,e^{j[\omega t+\psi(\omega)]}\,d\omega, \qquad (20)$$

из которого следует, что двойной интеграл Фурье дает представление о функции, как о сумме бесконечно большого числа векторов, обладающих амплитудами $\Delta P(\omega)$ с начальными фазами $\psi(\omega)$ и вращающихся с угловыми скоростями ω, отличающимися для смежных по частоте векторов на бесконечно малую величину.

Возьмем теперь уравнение теплового равновесия для случая гармонически изменяющихся потерь:

$$C\frac{d\tau}{dt}+A\tau=\Delta P_m\cos(\omega t+\alpha).$$

В этом случае потери формально могут быть представлены, как действительная часть комплексного числа:

$$\Delta P=\Delta P_m e^{j(\omega t+\alpha)}=\Delta\hat{P}_m e^{j\omega t},$$

где

$$\Delta\hat{P}_m=\Delta P_m e^{j\alpha}.$$

Тогда температуру τ также можно рассматривать как действительную часть некоторого комплексного числа

$$\tau=\hat{\tau}_m e^{j\omega t}.$$

При таком условии для установившегося режима, когда Mod τ_m постоянен, будем иметь $\frac{d\tau}{dt}=j\omega\,\hat{\tau}_m e^{j\omega t}$.

Подставляем эти выражения τ и $\frac{d\tau}{dt}$ в уравнение теплового равновесия

$$j\omega C\,\hat{\tau}_m e^{j\omega t}+A\hat{\tau}_m e^{j\omega t}=\Delta\hat{P}_m e^{j\omega t},$$

откуда

$$A(+j\omega C)\,\hat{\tau}_m=\Delta\hat{P}_m. \qquad (21)$$

Следовательно, для отдельных гармоник потерь и температуры будет иметь место соотношение (21).

Для постоянной составляющей ($\omega=0$) оператор теплоотдачи

$$\bar{A}+j\omega C=A, \qquad (22)$$

как это имеет место и в электрических цепях при переходе от синусоидального тока к постоянному.

Имея в виду (21) и применяя принцип суперпозиции, согласно которому общая температура двигателя при независимости A и C от τ может быть рассматриваема, как сумма температур, создаваемых каждой гармоникой потерь отдельно и независимо от остальных, получим из (20):

$$\tau(t)=\frac{1}{2}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{\Delta P(\omega)\,e^{j[\omega t+\psi(\omega)]}}{A+j\omega C}\,d\omega=$$

$$=\frac{1}{2}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{\Delta P(\omega)}{\sqrt{A^2+\omega^2C^2}}\,e^{j[\omega t+\psi(\omega)-\varphi(\omega)]}\,d\omega, \qquad (23)$$

где

$$\varphi(\omega)=\operatorname{arctg}\frac{\omega C}{A}.$$

Совершенно очевидно, что в данном случае

$$\frac{\Delta P(\omega)}{\sqrt{A^2+\omega^2C^2}}=\tau(\omega) \qquad (24)$$

есть частотный спектр амплитуд температур, а

$$\psi(\omega)-\varphi(\omega)=\theta(\omega) \qquad (25)$$

— частотный спектр начальных фаз температуры. Возвращаясь к рассматривавшемуся выше примеру графика потерь, получим:

$$\tau(\omega)=\frac{2\Delta P_a}{\pi\sqrt{A^2+\omega^2C^2}\,\omega}\sin\frac{\omega t_a}{2}$$

и

$$\theta(\omega)=\pi-\frac{\omega t_a}{2}-\operatorname{arctg}\frac{\omega C}{A}.$$

Из (23), принимая во внимание (24) и (25), находим

$$\tau(t)=\frac{1}{2}\int_{-\infty}^{+\infty}\tau(\omega)\cos[\omega t+\theta(\omega)]\,dt+$$

$$+j\frac{1}{2}\int_{-\infty}^{+\infty}\tau(\omega)\sin[\omega t+\theta(\omega)]\,d\omega. \qquad (26)$$

Так как синус — функция нечетная, то последний интеграл равен нулю, а принимая во внимание, что косинус функция четная:

$$\tau(t)=\int_{0}^{+\infty}\tau(\omega)\cos[\omega t+\theta(\omega)]\,d\omega. \qquad (26')$$

Из этого выражения, между прочим, следует, что температура двигателя достигает максимума не к моменту $t=t_a$, а к моменту времени, определяемому из условия:

$$\frac{d\tau(t)}{dt}=-\int_{0}^{\infty}\tau(\omega)\,\omega\sin[\omega t+\theta(\omega)]\,d\omega=0,$$

который, вообще говоря, не совпадает с t_a. Это объясняется явлением запаздывания температуры относительно потерь.

Заключение. Предлагаемый метод определения нагрева электродвигателя при повторно-кратковременной нагрузке помимо устранения неточности старого метода в отношении распределения максимумов и минимумов температуры во времени вскрывает физическую сущность тепловых параметров двигателей C и A и позволяет перенести готовый аппарат теории переменных токов в область тепловых расчетов.

Недостаток места не позволяет здесь полностью использовать мощный аппарат теории переменных токов применительно к тепловым расчетам. В частности, автор не мог показать здесь применения весьма плодотворного метода эквивалентных схем, который дает возможность перейти к конкретным понятиям о теплоемкости, теплопроводности и теплоотдаче отдельных элементов двигателя на базе двух фундаментальных теорем о пограничных условиях для температурного и теплового перепада, аналогичных пограничным условиям для электрического поля на границе раздела двух диэлектриков.

✧ ✧ ✧

Короткое замыкание генераторов постоянного тока

Доктор техн. наук, доц. Н. П. ЕРМОЛИН

Ленинградский электротехнический институт им. Ульянова (Ленина)

Рассматривается общий и приближенный расчет внезапного короткого замыкания генераторов постоянного тока с учетом нелинейности кривых намагничивания магнитных систем главных и добавочных полюсов, изменения рассеяния, реакции якоря, вихревых токов в массивных частях магнитной системы машины, индуктивности цепи якоря и других факторов. Дан анализ влияния параметров генератора на время нарастания и амплитуду тока к. з. Результаты исследования иллюстрированы числовым примером и опытными данными.

Внезапное к. з. крупных генераторов постоянного тока может сопровождаться тяжелыми последствиям для машины в случае образования кругового огня на коллекторе. В этом режиме в машине создается также значительный тормозящий момент, обусловливающий опасные механические напряжения скручивания вала. Во избежание этого требуются соответствующие средства защиты генераторов, выбор которых находится в зависимости от вида кривой тока к. з. и величины его. Ток к. з. зависит от нелинейности кривых намагничивания магнитных систем главных и добавочных полюсов машины, изменения магнитного рассеяния, индуктивности цепи якоря, взаимной индуктивности между цепями якоря и возбуждения, реакции якоря, вихревых токов в массивных частях магнитной системы машины и ряда других факторов. Между тем, существующая методика расчета тока к. з. генераторов постоянного тока не учитывает многих из этих факторов [Л. 1, 3, 5, 8], что нередко приводит к значительному расхождению расчета с опытом.

Аналитический учет всех указанных факторов при исследовании к. з. машины существенно приближает результаты расчета к опытным данным. Для этого в основу исследования достаточно положить электрическую схему рис. 1, представляющую общий случай компенсированной машины с независимым возбуждением, компаундной обмоткой и добавочными полюсами, из которой можно получить все частные случаи генераторов постоянного тока.

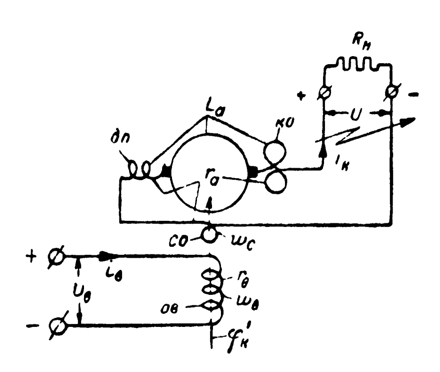


Рис. 1. Схема генератора (*ов*, *со*, *ко*, *дп* — обмотки возбуждения, сериесная, компенсационная и добавочных полюсов).

Общий расчет. При установившемся режиме работы генератора под нагрузкой имеют место следующие уравнения равновесия э. д. с. для цепей якоря и возбуждения и моментов на валу агрегата:

$$U = c'\Omega(\Phi_0 + \Phi) - r_a I_a - \Delta U_{щ},$$
$$U_в - r_в I_в = 0, \tag{1}$$
$$c'(\Phi_0 + \Phi) I_a + 9{,}81 \cdot M_{ж} + 9{,}81 \cdot M_{д} + $$
$$+ 9{,}81 \cdot M_{тр} - 9{,}81 \cdot M = 0,$$

где U и $U_в$ — напряжения на зажимах цепей якоря и возбуждения машины, V;

I_a и $I_в$ — номинальные токи якоря и возбуждения, A;

Φ_0 и Φ — поток остаточного магнетизма и полезный результирующий поток главного полюса, M (рис. 2);

Ω — угловая скорость вращения якоря, sec;

r_a и $r_в$ — омические сопротивления цепей якоря и возбуждения, Ω;

$\Delta U_{щ}$ — переходное падение напряжения в контактах двух разноименных комплектов щеток и коллектора, V;

M, $M_{ж}$, $M_{д}$, $M_{тр}$ — момент вращения приводного двигателя и моменты сопротивления, соответствующие потерям в стали, добавочным и механическим потерям якоря, kgm;

$c' = \frac{N}{2\pi} \cdot \frac{p}{a} 10^{-8}$ — постоянная обмотки якоря.

При внезапном к. з. генератора возникают дополнительные явления:

1. В цепи якоря индуктируется помимо основной э. д. с. вращения еще: а) э. д. с. самоиндукции в обмотках якоря, добавочных полюсов и компенсационной от изменения тока якоря — $L_a \frac{di_k}{dt}$, и б) э. д. с. самоиндукции и взаимной индукции в компаундной обмотке от изменения полного результирующего потока главных полюсов — $2pW_c \frac{(d\varphi_\kappa + \gamma_s \varphi_s)}{dt} 10^{-8}$.

2. Индуктирование в цепи возбуждения машины э. д. с. самоиндукции и взаимоиндукции от изменения того же потока — $2pW_в \frac{d(\varphi_\kappa + \gamma_s \varphi_s)}{dt} 10^{-8}$.

3. Значительное изменение магнитного рассеяния главных полюсов вследствие кратковременного возрастания тока возбуждения под влиянием размагничивающего действия реакции якоря, обусловленного сохранением постоянства потокосцеплений в обмотке возбуждения. Как показывают расчеты, коэффициент рассеяния в этом случае может возрасти в 2—3 и более раза по сравнению с его значением при холостом ходе машины. При таком увеличении рассеяния, несмотря на сохранение постоянства сцепления полного потока главного полюса с обмоткой возбуждения в первый момент к. з. полезный результирующий поток его уже в начале процесса заметно уменьшается и затем быстро убывает со временем (см. ниже рис. 5). Это обстоятельство является основной причиной ограничения максимума тока к. з. Для учета его можно поток рассеяния главных полюсов приближенно представить в виде следующей зависимости:

$$\Phi_s = (AW_в + AW_c)\lambda_s, \tag{2}$$

тогда полный результирующий поток, сцепляющийся с обмоткой возбуждения,

$$\Phi' = \Phi + \gamma_s \Phi_s, \tag{3}$$

где $(AW_в + AW_c)$ — ампервитки основной и компаундной обмоток на пару главных полюсов (рис. 2);

λ_s — магнитная проводимость путей замыкания потоков рассеяния в воздухе между главными полюсами, определяемая по конструктивным данным магнитной системы машины;

$\gamma_s = 0,7 - 0,8$ — коэффициент сцепления потока рассеяния с обмоткой возбуждения.

4. Наконец, кроме указанных явлений, при коротком замыкании возникают еще вихревые токи в массивных частях магнитных систем главных и добавочных полюсов машины, замедляющие процессы изменения во времени потоков этих полюсов.

4*

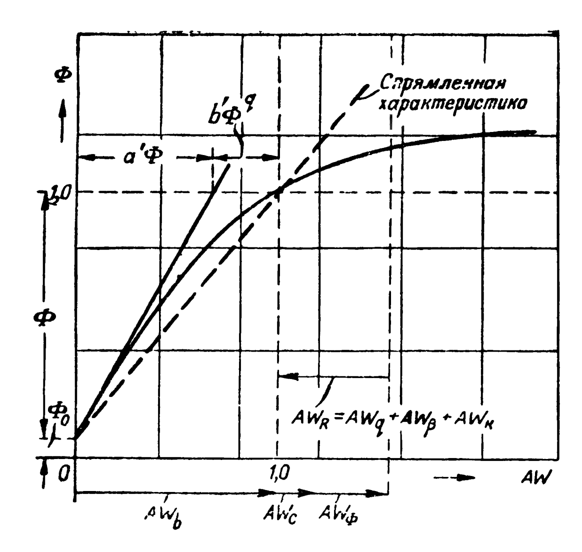


Рис. 2. Кривая намагничивания машины.

Таким образом, при внезапном к. з. генератора уравнения (1) примут следующий вид:

$$c'\omega'_\kappa \Phi_0 + c'\omega'_\kappa \varphi'_\kappa - r_a i'_\kappa - \Delta u_щ - L_a \frac{di'_\kappa}{dt} - 2pW_c \frac{d\varphi''_\kappa}{dt} 10^{-8} = 0,$$

$$U_в - r_в i'_{в\kappa} - 2pW_в \frac{d\varphi''_\kappa}{dt} 10^{-8} = 0, \tag{4}$$

$$c'\Phi_0 i'_\kappa + c'\varphi'_\kappa i'_\kappa + 9{,}81\, m'_{ж} + 9{,}81\, m'_д + 9{,}81\, m'_{тр} + 9{,}81\Theta \frac{d\omega'_\kappa}{dt} - 9{,}81\, m' = 0,$$

где Θ — момент инерции вращающихся маховых масс агрегата, kgmsec²,

φ''_κ — мгновенное значение потока по уравнению (3).

При к. з. генераторов во многих практических случаях скорость вращения якоря за время нарастания тока не успевает заметно измениться, что обусловлено инерцией вращающихся маховых масс агрегата и жесткостью характеристики скорости приводного синхронного или асинхронного двигателя. Только в случае приводного двигателя внутреннего сгорания может наблюдаться более заметное изменение скорости вращения. Однако, расчет и опыт показывают, что влияние изменения скорости вращения якоря на величину тока к. з. и в этом случае незначительно, так как с понижением скорости уменьшается размагничивающее действие реакции коммутационных токов. Поэтому в большинстве случаев расчета короткого замыкания генераторов можно без заметной погрешности пренебречь изменением скорости вращения приводного двигателя. Для этого в системе уравнений (4) нужно положить:

$$\omega'_\kappa = \Omega; \ \frac{d\omega'_\kappa}{dt} = 0 \ \text{и} \ \Theta = \infty.$$

Кривую намагничивания машины (рис. 2) аналитически можно представить с достаточным приближением следующим уравнением:

$$AW_в + AW_c + AW_ф - (AW_q + AW_β + AW_к) = a'Φ + b'Φ^q, \quad (5)$$

где поперечные, продольные и коммутационные ампервитки реакции якоря соответственно равны:

$$AW_q = AW_{q_0}\cdot i;\quad AW_β = 2b_β AS_н \cdot i;$$

$$AW_к = b_к\, AS_н \cdot i\left(1 - \gamma_к \frac{\varphi_д}{i}\right), \quad (5а)$$

а ампервитки вихревых токов в массивных частях магнитной системы машины

$$AW_ф = AW_в\left(b'_0 - \int \frac{ab}{dt}\, e^{\lambda_ф t}\cdot dt\right) e^{-\lambda_ф t} \quad (5б)$$

Кривую намагничивания добавочных полюсов в относительных единицах можно выразить так [Л. 7]:

$$\varphi_д = a_2 i + b_2 i^2 + c_2 i^3; \quad (6)$$

коммутирующий поток добавочных полюсов при переходных процессах [Л. 7]

$$\varphi'_д = (\beta_д - \varphi_0)\, e^{-\lambda_{фд} t} + e^{-\lambda_{фд} t} \times$$

$$\times \int \left(\frac{1}{3}\frac{d\varphi_д}{dt} + \lambda_{фд}\cdot\varphi_д\right) e^{\lambda_{фд} t}\cdot dt. \quad (7)$$

Если теперь поставить уравнения (3) и (5)—(7) в уравнения (4), то после исключения в последних части неизвестных и деления их на номинальную э. д. с. якоря $E_н = c'\Omega_н Φ_a$, получается следующая система нелинейных дифференциальных уравнений рассматриваемых процессов, выраженная в относительных единицах:

$$\frac{di_к}{dt} = \frac{F_1(i_к, \varphi_к, \varphi'_д, aw_ф)}{T_a T_в},$$

$$\frac{d\varphi_к}{dt} = \frac{F_2(i_к, \varphi_к, \varphi'_д, aw_ф)}{T_a T_в}, \quad (8)$$

$$\frac{d\varphi'_д}{dt} = \frac{1}{3}\left(a_2 + 2b_2 i_к + 3c_2 i^2_к\right) \times$$

$$\times \frac{F_1(i_к, \varphi_к, \varphi'_д, aw_ф)}{T_a T_в} + \lambda_{фд}(a_2 i_к + b_2 i^2_к +$$

$$+ c_2 i^3_к) - \lambda_{фд}\varphi'_д,$$

$$\frac{daw_ф}{dt} = -3\frac{F_2(i_к, \varphi_к, \varphi'_д, aw_ф)}{T_a T_в} - 3\lambda_ф aw_ф,$$

где $i_к$, $\varphi_к$, $\varphi'_д$ и $aw_ф$ — мгновенные значения тока к. з., полезного результирующего потока главного полюса, коммутирующего потока добавочного полюса и ампервитков вихревых токов в массивных частях магнитной системы главных полюсов в долях номинальных значений соответствующих величин; остальные обозначения определяются уравнениями (21а)—(21г) в приложении I.

Решение системы уравнений (8) можно произвести только численными методами приближенного интегрирования. Наиболее общим способом решения подобных уравнений является метод последовательных приближений, основывающийся на представлении их в форме конечных приращений или разностей.

В этом случае уравнения (8) примут вид:

$$\Delta i = \frac{F_1(i_m, \varphi_m, \varphi'_{дm}, aw_{фm})}{T_a T_в}\cdot \Delta t,$$

$$\Delta\varphi = \frac{F_2(i_m, \varphi_m, \varphi'_{дm}, aw_{фm})}{T_a T_в}\cdot \Delta t,$$

$$\Delta\varphi'_д = \frac{1}{3}(a_2 + 2b_2 i_m + 3c_2 i_m^2)\cdot \Delta i +$$

$$+ [\lambda_{фд}(a_2 i_m + b_2 i^2_m + c_2 i^3_m) - \lambda_{фд}\varphi'_{дm}]\cdot \Delta t, \quad (9)$$

$$\Delta aw_ф = -3\cdot\Delta\varphi - 3\lambda_ф aw_{фm}\cdot \Delta t,$$

где средние значения соответствующих величин за промежуток времени Δt будут:

$$i_m = i_к + \frac{\Delta i}{2};\ \varphi_m = \varphi_к + \frac{\Delta\varphi}{2};\ \varphi'_{дm} = \varphi'_д +$$

$$+ \frac{\Delta\varphi'_д}{2};\ aw_{фm} = aw_ф + \frac{\Delta aw_ф}{2}, \quad (10)$$

при этом $i_к$, $\varphi_к$, $\varphi'_д$, $aw_ф$ — предыдущие значения соответствующих величин, предшествующие данному промежутку времени.

Так как значения переменных в конце промежутка времени Δt неизвестны ввиду неизвестности искомых приращений их, то эти приращения определяются последовательными приближениями. Для этой цели за средние значения переменных в уравнениях (10) сначала принимают предыдущие значения их $i_к$, $\varphi_к$, $\varphi'_д$, $aw_ф$ и затем по уравнениям (9) находят первое приближение приращений этих переменных. Далее вносится поправка в расчет путем определения средних значений i_m, φ_m, $\varphi'_{дm}$, $aw_{фm}$ по уравнениям (10), подставляя в них полученные в предыдущем приращения Δi, $\Delta\varphi$ и т. д. После этого подстановкой в уравнения (9) исправленных средних значений переменных находят второе приближение приращений их и т. д., пока дальнейшие поправки уже не будут вносить заметных изменений в этих приращениях. В зависимости от величины выбранного промежутка времени Δt практически можно ограничиться вторым или третьим приближениями приращений переменных.

Уравнения (8) и (9), полученные для генератора с независимым возбуждением и компаундной обмоткой, применимы так же для расчета к. з. других типов генераторов постоянного тока, если положить в их коэффициентах F_1 и F_2, определяемых уравнениями (21а), (21б), неко-

торые параметры равными нулю. Так, например, нужно положить в случае:

1) генератора с независимым возбуждением без компаундной обмотки

$$T_c=0;\ T_{ск}=0;\ T_{cR}=0,$$

так как число витков компаундной обмотки $W_c=0$;

2) шунтового генератора с компаундной обмоткой

$$\varepsilon_в=0$$

так как при к. з. напряжение на зажимах цепи возбуждения $U_в=0$;

3) шунтового генератора без компаундой обмотки

$$T_c=0;\ T_{ск}=0;\ T_{cR}=0;\ \varepsilon_в=0,$$

так как

$$W_c=0 \text{ и } U_в=0.$$

При расчете по уравнениям (8) и (9) к. з. машин без добавочных полюсов третье уравнение в каждой системе отпадает.

Приближенный расчет. Изложенный выше способ расчета к. з. генераторов постоянного тока с учетом основных нелинейностей в них связан с решением нелинейных дифференциальных уравнений методом последовательных приближений. Однако, в ряде частных случаев этого расчета можно избежать применения указанного метода и получить желаемый результат более простым способом. Для этой цели в основу вывода расчетных уравнений нужно положить следующие допущения: 1) заменить кривую намагничивания машины спрямленной характеристикой, проходящей через начальную и номинальную точки кривой (рис. 2); 2) принять линейную зависимость ампервитков реакции якоря от тока; 3) пренебречь вихревыми токами в массивных частях магнитной системы машины; 4) предположить постоянство скорости вращения якоря.

Если теперь в уравнениях (4) положить:

$$\omega'_к=\Omega;\ \frac{d\omega'_к}{dt}=0;\ \Theta=\infty$$

и ампервитки реакций якоря принять:

$$AW_R\ i_к=(AW_{q0}+2b_\beta AS_н+AW_{к0})i_к, \quad (11)$$

то, после соответствующих преобразований их, получается следующая система линейных дифференциальных уравнений рассматриваемых процессов в относительных единицах:

$$\left(T_a+T_{cR}\right)\frac{di_к}{dt}+T_c\frac{d\varphi_к}{dt}+\varepsilon_a i_к-\varphi_к-(\varepsilon_0-\varepsilon_щ)=0,$$

$$T_{вR}\frac{di_к}{dt}+T_в\frac{d\varphi_к}{dt}+\varepsilon_{вR}\,i_к+\varepsilon'_в\varphi_к-\varepsilon_в=0, \quad (12)$$

где параметры этой системы определяются уравнениями (21в), (21г) в приложении 1.

Решение уравнений (12) при апериодическом процессе имеет вид:

$$i_к=\eta+\alpha_1 e^{s_1t}+\alpha_2 e^{s_2t}, \quad (13а)$$

$$\varphi_к=\xi+\beta_1 e^{s_1t}+\beta_2 e^{s_2t}. \quad (13б)$$

Коэффициенты даны в приложении 2.

Тормозящий момент генератора при коротком замыкании в относительных единицах

$$m_к=(\varepsilon_0+\varphi_к)i_к. \quad (14)$$

Максимум тока к. з. и тормозящего момента генератора наступает по истечении времени, определяемого из условия:

$$\frac{di_к}{dt}=0;\ \frac{dm_к}{dt}=0;$$

так для тока к. з. получается:

$$t_m=\frac{2{,}3}{s_1-s_2}\log\left(-\frac{s_2\alpha_2}{s_1\alpha_1}\right), \quad (15а)$$

а амплитуда тока

$$i_{кm}=\eta+\alpha_2\left(\frac{s_1-s_2}{s_1}\right)\left(-\frac{s_2\alpha_2}{s_1\alpha_1}\right)^{\frac{s_2}{s_1-s_2}} \quad (15б)$$

Для расчета к. з. разных типов генераторов по уравнениям (13а), (13б), (23а)—(23в), (24а)—(24в) нужно некоторые параметры в них положить равными нулю, как и в предыдущем расчете.

Влияние параметров генератора на характер процессов при к. з. Для анализа влияния параметров генератора на время нарастания и амплитуду тока к. з. по уравнениям (15а), (15б) удобно воспользоваться следующим суммарным относительным параметром машины:

$$\psi=\sqrt{1-x}, \quad (16)$$

где безразмерная величина

$$x=\frac{4B}{A^2}=$$

$$=\frac{4(\varepsilon_a\varepsilon'_в+\varepsilon_{вR})\frac{T_a}{T_в}}{\left[\varepsilon_a+\varepsilon'_в\frac{T_a}{T_в}+\varepsilon_{вc}\left(\varepsilon'_в\frac{T_{cs}}{T_в}+\frac{T_{вs}}{T_в}\right)+\varepsilon_{вR}\left(\varepsilon'_в\frac{T_{cs}}{T_в}+\frac{T_{вc}}{T_в}-\frac{T_c}{T_в}\right)\right]^2}, \quad (17)$$

при этом

$$\varepsilon_{вc}=\frac{2W_cI_a\cdot r_в}{2W_в c'\Omega_н\Phi_a};\quad T_{вs}=\frac{4pW^2_в\gamma_s\lambda_s\cdot 10^{-8}}{r_в};$$

$$T_{cs}=\frac{4pW_вW_c\gamma_s\lambda_s\cdot 10^{-8}}{r_в}.$$

Как показывает уравнение (17), величины x и ψ зависят от нескольких параметров, однако основными из них являются относительные омические падения напряжения в цепи якоря при номинальных условиях ε_a и цепи возбуждения от составляющей тока, компенсирующей реакцию якоря $\varepsilon_{вR}$.

На рис. 3 по уравнениям (16) и (17) представлены кривые x и ψ в зависимости от параметра $\varepsilon_{вR}$ при разных постоянных значениях ε_a и, наоборот, для генератора типа ГП-10 — 1 000 kW, 450 V, 735 об/мин с независимым и шунтовым возбуждениями без компаундной обмотки. В этом случае в уравнении (17) нужно положить $\varepsilon_{вc}=0$; $T_c=0$; $T_{cs}=0$, так как $W_c=0$. Как показывают кривые рис. 3, с увеличением относительного влияния реакции якоря в машине $\varepsilon_{вR}$ величина x сначала возрастает, достигая максимума при определенном значении $\varepsilon_{вR}$, а затем убывает при дальнейшем увеличении $\varepsilon_{вR}$. Одновременно величина $\psi=\sqrt{1-x}$ испытывает обратные изменения. Вместе с этим при увеличении относительного омического падения напряжения в цепи якоря ε_a наблюдается значительное уменьшение максимума x и относительного влияния реакции якоря на эту величину. Таким образом, влияние оми-

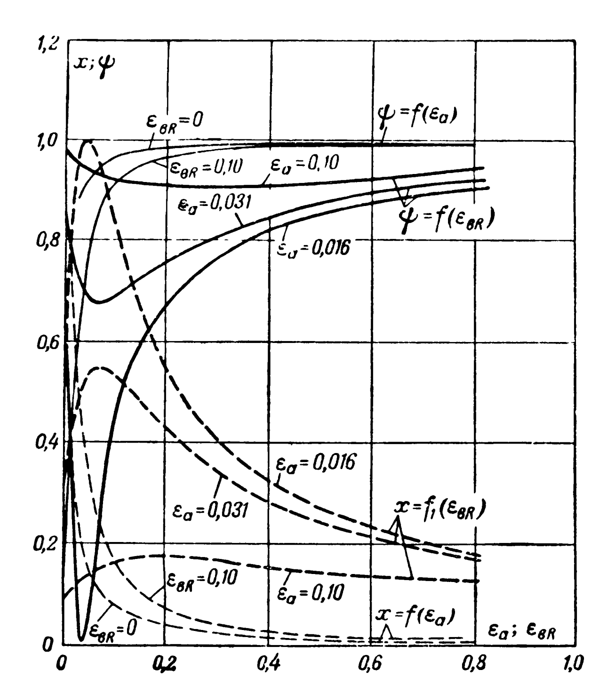


Рис. 3. Кривые $x=f(\varepsilon_{вR})$, $\psi=f(\varepsilon_{вR})$ и $x=f(\varepsilon_a)$, $\psi(\varepsilon_a)$.

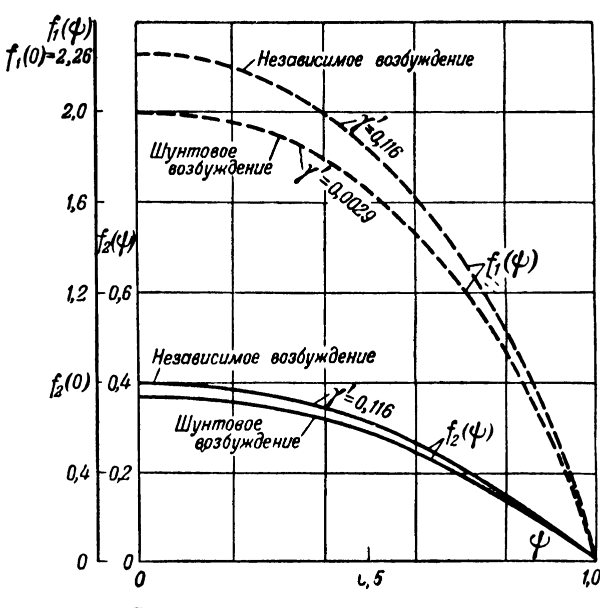


Рис. 4. Функции $f_1(\psi)$ и $f_2(\psi)$.

ческого сопротивления цепи якоря на величины x и ψ является значительно более эффективным, чем реакции якоря.

Максимум x и минимум ψ при определенных значениях параметров ε_a и $\varepsilon_{вR}$ соответствует наиболее неблагоприятному случаю к. з. генератора, так как при этих условиях согласно уравнениям (18) и (19) и кривым рис. 4 получается наибольшая амплитуда тока к. з. и большее время нарастания его. Если определить значение $\varepsilon_{вR}$ для максимума x из условия $\frac{dx}{d\varepsilon_{вR}}=0$ и подставить его в первое уравнение (23а), то время нарастания и амплитуду тока по уравнениям (15а), (15б) можно представить в функции относительного параметра машины ψ так:

$$t_m=\frac{T_в D}{2}\cdot f_1(\psi), \tag{18}$$

$$i_{кm}=\eta'\cdot f_2(\psi), \tag{19}$$

где

$$f_1(\psi)=\frac{1-\psi^2}{\psi}\cdot\ln\left[\frac{1-\gamma'(1-\psi^2)+\psi}{1-\gamma'(1-\psi^2)-\psi}\right], \tag{18а}$$

$$f_2(\psi)=\gamma'(1-\psi^2)+[1-\gamma'(1-\psi^2)+\psi]\left[\frac{1-\gamma'(1-\psi^2)-\psi}{1-\gamma'(1-\psi^2)+\psi}\right]^{\frac{1+\psi}{\psi}}, \tag{19а}$$

$$\gamma'=\frac{[\varepsilon_в+(\varepsilon_0-\varepsilon_щ)\varepsilon'_в]D}{\varepsilon_0+\beta-\varepsilon_щ};\quad \eta'=\frac{(\varepsilon_0+\beta-\varepsilon_щ)T_в D}{T_a};$$

$$D=\varepsilon'_в\frac{T_{cs}}{T_в}+\frac{T_{вs}}{T_в}-\frac{T_c}{T_в}. \tag{18б}$$

При апериодическом процессе к. з. генератора предельные значения параметра будут $0\leqslant\psi\leqslant1$, чему соответствуют значения функций

$$\left.\begin{aligned} f_1(0)&=\frac{2}{1-\gamma'} \text{ и } f_1(1)=0,\\ f_2(0)&=\gamma'+(1-\gamma')e^{-\frac{1}{1-\gamma'}} \text{ и } f_2(1)=0.\end{aligned}\right\} \tag{20}$$

На рис. 4 по уравнениям (18а) и (19а) представлены кривые функций $f_1(\psi)$ и $f_2(\psi)$ в зависимости от параметра ψ при определенном значении величины γ' для генератора типа ГП-10-1000. Как показывают эти кривые, наибольшие значения времени нарастания и амплитуды тока к. з. по уравнениям (18) и (19) получаются при $\psi=0$ или $x=1$. С увеличением же ψ эти величины вначале медленно, а затем сравнительно быстро уменьшаются по мере приближения ψ к единице. В шунтовом генераторе при равных условиях они получаются на несколько процентов меньше, чем в генераторе с независимым возбуждением. Следовательно, максимум тока к. з. практически мало зависит от способа возбуждения генератора.

Приложение 1.

Значения коэффициентов уравнений (8) следующие:

$$F_1(i_к,\varphi_к,\varphi'_д,aw_ф)=(\varepsilon_0-\varepsilon_щ)T_в-\varepsilon_в T_c-(\varepsilon_a T_в-\varepsilon_{вR}T_c)i_к-\varepsilon_ф T_c aw_ф+(T_в+\varepsilon'_в T_c)\varphi_к+\varepsilon''_в T_c\varphi^q_к-\varepsilon_к\gamma_к\cdot T_c\varphi'_д; \tag{21а}$$

$$\begin{aligned}F_2(i_к,\varphi_к,\varphi'_д,aw_ф)=&-(\varepsilon_0-\varepsilon_щ)T_{вR}+\varepsilon_в(T_a+T_{cR})+[\varepsilon_a T_{вR}-\varepsilon_{вR}(T_a+T_{cR})]i_к+\varepsilon_ф(T_a+T_{cR})aw_ф-[T_{вR}+\varepsilon'_в(T_a+T_{cR})]\varphi_к-\varepsilon''_в(T_a+T_{cR})\varphi^q_к-\gamma_к[T_aT_{вк}\lambda_{фд}-\varepsilon_к(T_a+T_{cR})]\varphi'_д-[-\\&-(\varepsilon_0-\varepsilon_щ)T_{вк}+\varepsilon_в T_{ск}+(\varepsilon_a T_{вк}-\varepsilon_{вR}T_{ск})i_к+\varepsilon_ф T_{ск}aw_ф-(T_{вк}+\varepsilon'_в T_{ск})\varphi_к-\varepsilon''_в T_{ск}\varphi^q_к+\\&+\varepsilon_к\gamma_к T_{ск}\varphi'_д]\cdot(a_2+2b_2i_к+3c_2i^2_к)\cdot\frac{\gamma_к}{3}+\gamma_к T_a T_{вк}\lambda_{фд}\cdot(a_2i_к+b_2i^2_к+c_2i^3_к).\end{aligned} \tag{21б}$$

Относительные падения напряжения при номинальных условиях:

$$\varepsilon_a=\frac{r_aI_a+b_3}{c'\Omega_н\Phi_a};$$

$$\varepsilon_{вR}=\frac{(AW_{q0}+2b_\beta AS_н+b_кAS_н-2W_cI_a)r_в}{2W_в\cdot c'\Omega_н\Phi_a};$$

$$\varepsilon_щ=\frac{a_3}{c'\Omega_н\Phi_a};\quad \varepsilon_0=\frac{\Phi_0}{\Phi_a}; \tag{21в}$$

$$\varepsilon_в=\frac{U_в}{c'\Omega_н\Phi_a};\quad \varepsilon'_в=\frac{a\Phi_a r_в}{c'\Omega_н\Phi_a};\quad \varepsilon''_в=\frac{b\Phi^q_a r_в}{c'\Omega_н\Phi_a};$$

$$\varepsilon_ф=\frac{r_вI_в}{c'\Omega_н\Phi_a};\quad \varepsilon_k=\frac{b_кAS_нr_в}{2W_в\cdot c'\Omega_н\Phi_a};$$

постоянные времени при тех же условиях:

$$T_a = \frac{L_a I_a}{c\Omega_{н}\Phi_a}; \quad T'_c = \frac{2pW_c(1+2W_{в}\cdot a\gamma_s\lambda_s)\Phi_a\cdot 10^{-8}}{c'\Omega_{н}\Phi_a};$$

$$T''_c = \frac{2pW_c\cdot 2W_{в}\cdot b\Phi^q{}_a\cdot\gamma_s\lambda_s 10^{-8}}{c'\Omega_{н}\Phi_a}; \quad T_c = T'_c + \frac{1}{2}qT''_c;$$

$$T_{cR} = \frac{2pW_c(AW_{q0}+2b_\beta AS_{н}+b_{к}AS_{н})\gamma_s\lambda_s 10^{-8}}{c'\Omega_{н}\Phi_a};$$

$$T_{ск} = \frac{2pW_c b_{к} AS_{н}\gamma_s\lambda_s\cdot 10^{-8}}{c'\Omega_{н}\Phi_a}; \tag{21г}$$

$$T'_{в} = \frac{2pW_{в}(1+2W_{в}\cdot a\gamma_s\lambda_s)\cdot\Phi_a 10^{-8}}{c'\Omega_{н}\Phi_a};$$

$$T''_{в} = \frac{2pW_{в}\cdot 2W_{в}b\Phi^q{}_a\gamma_s\lambda_s 10^{-8}}{c'\Omega_{н}\Phi_a}; \quad T_{в} = T'_{в} + \frac{1}{2}q\cdot T''_{в};$$

$$T_{вR} = \frac{2pW_{в}(AW_{q0}+2b_\beta AS_{н}+b_{к}AS_{н})\gamma_s\lambda_s 10^{-8}}{c'\Omega_{н}\Phi_a};$$

$$T_{вк} = \frac{2pW_{в}\cdot b_{к}AS_{н}\gamma_s\lambda_s\cdot 10^{-8}}{c'\Omega_{н}\Phi_a};$$

$\lambda_{ф}$ и $\lambda_{фд}$ — коэффициенты затухания вихревых токов в массивных частях магнитных систем главных и добавочных полюсов, зависящие от размеров этих частей.

Приложение 2

Для решения системы уравнений (12) удобно применить операторное исчисление. Тогда с учетом начальных условий в момент $t=0$ $i_{к}(0)=\alpha$ и $\varphi_{к}(0)=\beta$ получается:

$$i_{к} = \frac{\alpha p^2 + C_1 p + D_1}{p^2 + Ap + B}, \tag{22а}$$

$$\varphi_{к} = \frac{\beta p^2 + C_2 p + D_2}{p^2 + Ap + B}, \tag{22б}$$

где

$$A = \frac{T_{в}\varepsilon_a - T_c\varepsilon_{вR} + (T_a + T_{cR})\varepsilon'_{в} + T_{вR}}{T_a T_{в}};$$

$$B = \frac{\varepsilon_a\varepsilon'_{в} + \varepsilon_{вR}}{T_a T_{в}}, \tag{23а}$$

$$C_1 = \frac{T_{в}(\varepsilon_0+\beta-\varepsilon_{щ}) + [(T_a+T_{cR})\varepsilon'_{в} + T_{вR}]\cdot\alpha}{T_a T_{в}};$$

$$D_1 = \frac{\varepsilon_{в} + (\varepsilon_0 - \varepsilon_{щ})\varepsilon'_{в}}{T_a T_{в}}, \tag{23б}$$

$$C_2 = \frac{(T_a+T_{cR})(\varepsilon_{в}-\varepsilon_{вR}\cdot\alpha) + (T_{в}\varepsilon_a - T_c\varepsilon_{вR})\beta - T_{вR}(\varepsilon_0 - \varepsilon_{щ} - \varepsilon_a\cdot\alpha)}{T_a T_{в}}; \tag{23в}$$

$$D_2 = \frac{\varepsilon_{в}\varepsilon_a - (\varepsilon_0 - \varepsilon_{щ})\varepsilon_{вR}}{T_a T_{в}}.$$

Применяя теорему разложения, получим гри апериодическом процессе:

$$i_{к} = \eta + \alpha_1 e^{s_1 t} + \alpha_2 e^{s_2 t}, \tag{13а}$$

$$\varphi_{к} = \xi + \beta_1 e^{s_1 t} + \beta_2 e^{s_2 t}, \tag{13б}$$

где $s_{1,2} = -\frac{A}{2} \pm \sqrt{\frac{A^2}{4} - B}$ — корни уравнения $p^2 + Ap + B = 0$,

$$\eta = \frac{\varepsilon_{в} + (\varepsilon_0 - \varepsilon_{щ})\varepsilon'_{в}}{\varepsilon_a\varepsilon'_{в} + \varepsilon_{вR}}; \quad \xi = \frac{\varepsilon_{в}\varepsilon_a - (\varepsilon_0 - \varepsilon_{щ})\varepsilon_{вR}}{\varepsilon_a\varepsilon'_{в} + \varepsilon_{вR}}, \tag{24а}$$

$$\alpha_1 = \frac{\alpha s_1^2 + C_1 s_1 + D_1}{s_1(s_1 - s_2)}; \quad \alpha_2 = -\frac{\alpha s_2^2 + C_1 s_2 + D_1}{s_2(s_1 - s_2)}, \tag{24б}$$

$$\beta_1 = \frac{\beta s_1^2 + C_2 s_1 + D_2}{s_1(s_1 - s_2)}; \quad \beta_2 = -\frac{\beta s_2^2 + C_2 s_2 + D_2}{s_2(s_1 - s_2)}. \tag{24в}$$

Сравнение расчета с опытом. Ниже производится сравнение результатов расчета короткого замыкания генератора типа ГП-10-1000, 1 000 kW, 450 V, 2 200 A, 735 об/мин с экспериментальными данными, полученными заводом „Электросила". Экспериментальное исследование к. з. этого генератора производилось при нормальном числе оборотов, 90% номинального напряжения на зажимах разомкнутого якоря и независимом возбуждении.

Генератор принадлежит агрегату Ильгнера с маховым моментом вращающихся масс $GD^2 = 87\,550$ kg·m², поэтому скорость вращения агрегата за время нарастания тока короткого замыкания генератора практически почти не изменялась.

а) Расчет к. з. методом последовательных приближений по уравнениям (9). Данные генератора следующие:

$U = c'\Omega_{н}\Phi_a = 0{,}9\cdot 450 = 405$ V; $\Phi_a = 4{,}78\cdot 10^6$ M; $U_{в} = 115$ V; $I_{в} = 50{,}4$ A; $a = 10{,}7\cdot 10^{-6}$; $b = 0{,}0146\cdot 10^{-18}$; $q=3$; $2p=10$; $W_{в}=72$; $W_c=0$; $r_{в}=2{,}28$ Ω; $\lambda_s=110$; $\gamma_s=0{,}75$; $\Phi_0 = 0{,}03\cdot\Phi_a$; $\Omega_{н}=77$; $c'=1{,}1\cdot 10^{-6}$; $AS_{н}=345$ A/cm; $b_{к}=7{,}55$ cm; $L_a=0{,}000109$ H: $r_a=0{,}0055$ Ω; $a_3=2{,}1$V; $b_3=0{,}4$ V; $\gamma_{к}=1{,}07$; $\Phi_{д0}=0{,}182\cdot 10^{-6}$ M; $2b_\beta AS_{н}=180$; $a_2=0{,}97$; $b_2=0{,}026$; $c_2 = -0{,}01$; $\lambda_{ф}=4$ — 1/sec; $\lambda_{фд}=3{,}7$ — 1/sec; $AW_{q0}=0$.

Параметры и постоянные времени по уравнениям (21в), (21г).

$\varepsilon_0=0{,}03$; $\varepsilon_a=0{,}031$; $\varepsilon_{вR}=0{,}109$; $\varepsilon_{щ}=0{,}0052$; $\varepsilon_{к}=0{,}102$; $\varepsilon_{ф}=0{,}284$; $\varepsilon_{в}=0{,}284$; $\varepsilon'_{в}=0{,}289$; $\varepsilon''_{в}=0{,}009$;

$T_a=0{,}0006$; $T'_{в}=0{,}096$; $T''_{в}=0{,}000335$; $T_{в}=0{,}0965$; $T_{вR}=0{,}0041$; $T_{вк}=0{,}0038$ sec.; $T'_c=0$; $T''_c=0$; $T_c=0$; $T_{cR}=0$;

$T_{ск}=0$; $\lambda_{ф}=4$ — 1/sec; $\lambda_{фд}=3{,}7$ — 1/sec.

Если принять приращение времени $\Delta t=0{,}001$ sec., то уравнения (9), с учетом уравнений (21а), (21б) в рабочем виде примут вид:

$$\Delta i = 0{,}0413 - 0{,}0516\cdot i_m + 1{,}666\cdot\varphi_m; \quad \Delta\varphi = 0{,}001747 + 0{,}000539\times i_m - 0{,}0511\cdot\varphi_m + 0{,}000975\cdot\varphi'_{дm} + 0{,}00294\cdot aw_{фm} - 0{,}0000933\times\varphi^3_m - 0{,}0000511\cdot i^2_m + 0{,}0000115\cdot i^3_m + 0{,}00122\cdot\varphi_m\cdot i_m - 0{,}000701\cdot\varphi_m\cdot i^2_m; \tag{9а}$$

$$\Delta\varphi'_{д} = (0{,}323 + 0{,}01735\cdot i_m - 0{,}01\cdot i^2_m)\cdot\Delta i - 0{,}0037\cdot\varphi'_{дm} + 0{,}00359\cdot i_m + 0{,}0000962\cdot i^2_m - 0{,}000037\cdot i^3_m; \quad \Delta aw_{ф} = -3\times\Delta\varphi - 0{,}012\cdot aw_{фm}.$$

Начальные условия:

при $t=0$: $i_{к}(0)=\alpha=0$; $\varphi_{к}(0)=\beta=0{,}97$; $\varphi'_{д}(0)=0$; $aw_{ф}(0)=0$.

Полагая в первом приближении средние значения i_m, φ_m, $\varphi'_{дm}$, $aw_{фm}$ в уравнениях (9а) согласно уравнениям (10) равными начальным значениям переменных, получим первое приближение их приращений:

$\Delta i = +1{,}6573$; $\Delta\varphi = -0{,}04793$; $\Delta\varphi'_{д} = +0{,}5350$; $aw_{ф} = +0{,}1435$.

Далее, по уравнениям (10) находится второе приближение i_m, φ_m и т. д., а по уравнениям (9а) — их приращения. Ограничившись вторым приближением приращений переменных, можно получить значения $i_{к}$, $\varphi_{к}$, $\varphi'_{д}$ и $aw_{ф}$ за время Δt, $2\Delta t$ и т. д.

На рис. 5 представлены опытная и расчетные кривые тока к. з., результирующего потока и тормозящего момента генератора ГП-10-1000, полученные методом последовательных приближений по уравнениям (9а). Как показывает рис. 5, сплошная расчетная кривая тока в общем достаточно хорошо совпадает с опытной, отклоняясь только в районе максимума кривой в сторону превышения до

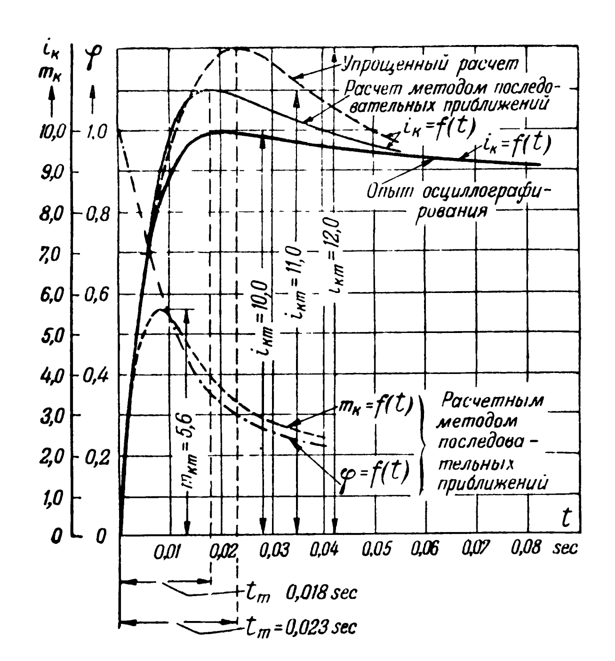


Рис. 5. Опытная и расчетная кривые тока короткого замыкания генератора ГП-10-1000.

10%. Нарастание же тока до максимума по расчету и опыту происходит за время t_m=0,018 sec. Максимум тормозящего момента генератора наступает ранее максимума тока к. з. и составляет через t_m= 0,008 sec. 5,6 номинального значения или на 45% менее расчетной кратности тока. Кривая $\varphi = f(t)$ иллюстрирует значительное уменьшение полезного результирующего потока машины под влиянием реакции якоря и магнитного рассеяния главных полюсов. Этот поток в момент максимума тока короткого замыкания составляет всего лишь 0,31 номинального значения.

б) Приближенный расчет к. з. по линейным уравнениям (12), (13а), (13б), (23а), (23б) и (24а), (24б): данные генератора те же, кроме: a=10,85·10⁻⁶; $AW_{к0}$ = 2 240; AW_R=180 + 2 240=2 420 [уравнение (11)]. Тогда параметры и постоянные времени по уравнениям (21в), (21г) будут:

$$\varepsilon_0=0,03;\ \varepsilon_a=0,031;\ \varepsilon_{вR}=0,0945;\ \varepsilon_щ=0,0052;\ \varepsilon_в=0,284;\ \varepsilon'_в=0,292.$$

$$T_a=0,0006;\ T_в=0,096;\ T_{вR}=0,00355;\ T_c=0;\ T_{cR}=0$$

соответствующие коэффициенты по уравнениям (23а)—(23в) и (24а)—(24в) будут:

$$A=116,2;\ B=1\,800;\ C_1=1\,655;\ D_1=5\,050;\ C_2=51,4;\ D_2=112;$$
$$s_1=-18,4,\ s_2=-97,8;\ \gamma=2,8;\ \alpha_1=+17,4;\ \alpha_2=-20,2;\ \xi=$$
$$=0,062;\ \beta_1=+0,346;\ \beta_2=+0,562.$$

Уравнения тока к. з. и результирующего потока в относительных единицах по уравнениям (13а), (13б) примут вид:

$$i_к=2,8+17,4\,e^{-18,4\cdot t}-20,2\cdot e^{-97,8\cdot t}, \quad (13а')$$

$$\varphi_к=0,062+0,346\,e^{-18,4\cdot t}+0,562\cdot e^{-97,8\cdot t}. \quad (13б')$$

Уравнение тормозящего момента генератора по уравнению (14) будет:

$$m_к=0,258+2,57\,e^{-18,4\cdot t}+6,02\cdot e^{-36,8\cdot}-$$
$$-0,288\cdot e^{-97,8\cdot t}+2,80\cdot e^{-116,2\cdot t}-11,35\cdot e^{-195,6\cdot t}. \quad (14а)$$

Нарастание тока к. з. до максимума по уравнениям (13а') и (15а) происходит за время t_m=0,023 sec., тогда как по опыту (рис. 5) t_m=0,018 sec. превышение расчетного значения времени t_m над опытным составляет 27%.

Величина максимума тока по уравнению (15б) составляет $i_{кm}$ = 12,0, тогда как по опыту (рис. 5) $i_{кm}$ =10,0; превышение расчетного значения $i_{кm}$ над опытным 20%.

Максимум тормозящего момента генератора по уравнению (14а) наступает ранее максимума тока короткого замыкания и составляет через t_m=0,011 sec. 5,7 номинального значения, или на 52% менее расчетной кратности тока.

На рис. 5 пунктиром представлена расчетная кривая тока к. з. по уравнению (13а').

Выводы. Таким образом, исследование внезапного короткого замыкания генераторов постоянного тока показало:

1. Величина максимума тока короткого замыкания практически мало зависит от способа возбуждения машины.

2. Максимум тормозящего момента генератора наступает ранее максимума тока короткого замыкания и кратность его на 30—50% менее кратности тока.

3. Снижение скорости вращения якоря при коротком замыкании практически мало влияет на величину амплитуды тока, так как с понижением ее происходит ослабление размагничивающего действия реакции коммутационных токов.

4. Короткое замыкание генераторов может протекать в форме апериодического и периодического процессов, при этом наиболее неблагоприятным случаем является такой, когда значения относительного падения напряжения и реакции якоря соответствуют условию перехода апериодического процесса в периодический.

5. Результаты расчета короткого замыкания генератора методом последовательных приближений по нелинейным дифференциальным уравнениям (9) достаточно согласовываются с опытом. Однако, и приближенный расчет максимума тока короткого замыкания по линейным уравнениям (12) также не слишком расходится с ним.

Литература

1. Т. В. Кукв а. Переходный процесс при внезапном коротком замыкании шунтового генератора. ВЭП, № 9, 1940.

2. Н. П. Ермолин. Коммутация машин постоянного тока при кратковременных перегрузках. Электричество, № 6, 1947.

3. J. Biermans. Ausgleichvorgänge beim Kurzschluss von Kollektormaschinen. Arch. f. El., Bd VII, № 1, стр. 1, 1918.

4. W. Klein. Generatorschutz für Gleichstromgeneratoren Ziemens-Zeitsch., № 10, стр. 453, 1931.

5. H. Hess. Kurzschlusstrom und Schutz grosser Gleichstromgeneratoren. Arch. f. El., Bd. XXVII, № 7, стр. 467, 1933.

6. H. Bany. Relay and Circuit Breaker Protection for D—C Machines, GER, v. 43, № 8, стр. 312, 1940.

7. J. Hously and Jeusen. Protection of Large D—C Machines by means of Highspeed Circuit-Breaker. Trans. AIEE, v. 63. сент., стр. 637, 1944.

8. G. Frost. The Short-Circuit Caracteristics of D—C Generators, El. End., июнь, стр. 394, 1946.

Высоковольтные изоляторы для высокочастотных устройств

Доктор техн. наук, проф. Н. П. БОГОРОДИЦКИЙ и инж. А. В. ДМИТРИЕВ

Ленинградский электротехнический институт им. Ульянова (Ленина)

Сообщаются экспериментальные данные о величинах разрядных напряжений высоковольтных керамических изоляторов, предназначаемых для высокочастотных устройств. Рассматривается явление поверхностного разряда при радиочастотах, промышленной частоте и постоянном напряжении. Приводятся соображения по вопросам конструирования высоковольтных высокочастотных изоляторов.

Освоение современных высоковольтных высокочастотных устройств потребовало создания специальных материалов и деталей. Весьма важную роль в указанных устройствах играют опорные и проходные изоляторы на высокие напряжения. Ниже рассматриваются конструкции таких изоляторов в отношении величин напряжений поверхностного разряда при высоких и низких частотах. Вопрос нагрева изоляторов в переменном электрическом поле не затрагивается, так как при выбранных материалах и конструкциях изоляторов для данного диапазона частот это явление практически не наблюдается.

Разряд в воздухе при высоких частотах. Опыт показывает, что напряжение искрового разряда между электродами в воздухе зависит от частоты прилагаемого напряжения. В случае однородных электрических полей при расстоянии между электродами больше 5 mm наблюдается снижение разрядных напряжений, когда частота напряжения превысит значения 20 ÷ 60 kHz. Это снижение достигает наибольших значений в диапазоне частот $10^6 \div 10^7$ Hz, причем разрядные напряжения составляют 75—80% от соответствующих значений при 50 Hz. При частотах больше 10^7 Hz разрядные напряжения начинают возрастать. Наши исследования производились в диапазоне частот от 200 до 400 kHz.

Появление коронной формы разряда при радиочастотах наблюдается при напряженностях поля несколько пониженных в сравнении с технической частотой, причем видимая часть короны характеризуется как большими геометрическими размерами, так и интенсивным термическим эффектом. Это является одной из причин значительного снижения напряжений искрового разряда между электродами в неоднородных полях. Величина разрядных напряжений в этих случаях может составлять, как будет показано ниже, 50% и меньше от соответствующих значений при 50 Hz.

В общем случае на величину разрядного напряжения оказывают влияние следующие факторы:

1. Форма электрического поля, обусловленная конфигурацией электродов и конфигурацией диэлектрика или плотностью контакта между электродом и диэлектриком.

2. Частота поля.

3. Состояние (увлажнение, загрязнение) поверхности.

4. Емкость, образованная электродами (диэлектрическая проницаемость, толщина материала).

5. Относительная плотность воздуха (температура, давление).

Степень влияния указанных выше первых четырех факторов была нами установлена специальным исследованием, результаты которого приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, одним из важнейших факторов, определяющих разрядное напряжение, следует считать форму электрического поля. Наибольшие значения разрядных напряжений получены в однородном поле (пп. 1 и 2), когда корона не наблюдается. Частота мало сказывается на разрядных напряжениях таких изоляторов, хотя очень сильно влияет на величины перекрывающих напряжений в неоднородных полях (пп. 4 и 5). Изолятор (п. 4) с электродами, не доходящими до края диэлектрика, отличается наибольшей неоднородностью поля, и это обусловливает возникновение на электродах короны при пониженных напряжениях, а на высокой частоте — резко уменьшенные значения напряжения перекрытия.

Влияние влажности на разрядное напряжение в однородном поле очень велико при частоте 50 Hz и отсутствует при высокой частоте.

Величина диэлектрической проницаемости материала изолятора влияет на разрядные напряжения конструкции только при наличии неоднородного поля в случае последовательного включения воздуха и твердого диэлектрика между электродами. Чем выше диэлектрическая проницаемость материала, тем больше оказывается напряженность в газовом промежутке. При малой толщине диэлектрика с электродами, не пол-

Таблица 1

Разрядные напряжения по поверхности изолятора в зависимости от формы, диэлектрической проницаемости материала изолятора и частоты поля

№ п/п.	Форма изолятора (XXX — обозначение электрода)	Относительная влажность воздуха, %	Напряжение перекрытия, kV_{eff}			
			$\varepsilon = 6$		$\varepsilon = 60$	
			$f = 50Hz$	$f = 10^6Hz$	$f = 50Hz$	$f = 10^6Hz$
1		40 90	20÷25 12÷14	17÷19 17÷19	25÷30 12÷14	17÷19 17÷19
2		40 90	20÷26 12÷14	17÷19 17÷19	25÷30 12÷14	17÷19 17÷19
3		40 90	14÷16 11÷12	11÷12 11÷12	14÷16 7÷8	11÷12 11÷12
4		40 90	15÷17 12÷13	8÷9 8÷9	15÷17 7÷8	7÷8 7÷8
5		40 90	10÷11 9÷10	2,5 (корона) 2,5 (корона)	6÷7 5÷6	2 (корона) 2 (корона)
6		60	7 (скользящий разряд [1])	2,0 (корона)	—	—

[1] 45 kV при постоянном напряжении.

ностью покрывающими поверхность (пп. 5 и 6), разряд наступает тем раньше, чем больше диэлектрическая проницаемость материала, причем наблюдается скользящий разряд. У изоляторов по п. 6 разряд при постоянном токе наступает при более высоком напряжении, чем при переменном напряжении.

Изоляторы из материалов с большой диэлектрической проницаемостью (пп. 3 и 4) в атмосфере высокой влажности отличаются разрядными напряжениями при низкой частоте заметно меньшими, чем изоляторы из материалов с малым значением диэлектрической проницаемости. Это явление, повидимому, связано с адсорбционными свойствами материала.

Конструкции высоковольтных высокочастотных изоляторов. По своему назначению изоляторы можно подразделить на опорные и проходные. Кроме различия по применению эти изоляторы существенно отличаются по конфигурации электрического поля между электродами. О п о р н ы е и з о л я т о р ы позволяют получить близкое к равномерному распределение градиентов в междуэлектродном пространстве или по крайней мере устранить места с резко повышенными напряженностями поля. В п р о х о д н ы х и з о л я т о р а х сама конструкция предопределяет наличие неоднородного электрического поля. Как указывалось выше, в равномерных электрических полях электрическая прочность воздуха падает с увеличением частоты пробивного напряжения. В диапазоне частот от 200 до 400 kHz по нашим данным воздух пробивается не при градиентах 30 ÷ 32 kV_{max}/cm, отвечающих низким частотам, а (при прочих равных условиях) при 26 ÷ 27 kV_{max}/cm.

Для конструкций изоляторов с близким к однородному распределением электрического поля не наблюдается значительных расхождений в разрядных напряжениях при низких и высоких частотах. В неравномерных полях имеет место значительная разница в величинах разрядных напряжений при низкой и высокой частотах, причем разряду предшествует корона.

Если при напряжениях промышленной частоты коронный разряд не является опасным для неорганической изоляции и в ряде случаев даже допустим, т о п р и в ы с о к и х ч а с т о т а х в о з н и к н о в е н и е к о р о н ы д о л ж н о б ы т ь с о в е р ш е н н о и с к л ю ч е н о. Интенсивность высокочастотного коронного разряда обусловливается в первую очередь термическими процессами на электродах. Местный разогрев электрода, повидимому, обусловлен бомбардировкой его положительными ионами, не успевающими в течение полупериода диффундировать в окружающее пространство.

Начальное напряжение видимой короны определяет предельно допустимое напряжение конструкции при высокой частоте ввиду того, что коронирование может привести к разрушению диэлектрика и даже арматуры изолятора. Появлению высокочастотного коронного разряда на арматуре могут способствовать мелкие дефекты на поверхности электродов (царапины, заусеницы). Потенциал потухания короны ниже, чем потенциал зажигания, и разряд, возникнув при случайном перенапряжении, может существовать даже при рабочем напряжении установки.

Из вышесказанного следует, что изоляторы, предназначенные для установок высокой частоты, должны обладать значительно более равномерным распределением градиентов напряжения в междуэлектродном пространстве, чем конструкции, используемые в установках промышленной частоты. Поэтому радиусы закруглений арматуры должны быть достаточно большими, а поверхность арматуры — гладкой. Острые кромки и углы не допускаются. Критерием правильной конструкции высокочастотного изолятора может служить отсутствие коронного разряда, т. е. при повышении напряжения разряд между электродами должен сразу принимать характер искрового перекрытия

Для опорных конструкций наиболее простым средством для выравнивания градиентов напряжения в междуэлектродном пространстве является снабжение электродов кольцами с достаточно большими радиусами кривизны. Требуемые радиусы кривизны колец зависят от высоты и диаметра изолятора.

Изоляторы подобной конструкции представлены на рис. 1, а их характеристики—в табл. 2.

Для проходных изоляторов задача выравнивания электрического поля между электродами значительно более сложна. Однако и здесь можно использовать противокоронные кольца, но в несколько ином виде. Такие изоляторы могут быть изготовлены из керамических материалов, допускающих выполнение изделий сложной конфигурации. Противокоронные кольца в этом случае располагаются около центрального электрода и представляют собой кольцевые пазы с металлизированной внутренней поверхностью. Нами разработаны и испытаны две конструкции проходных изоляторов (рис. 2 и 3 и табл. 3 и 4). Изоляторы дискового типа целесообразно использовать в установках с частотами 100 ÷ 250 kHz; изоляторы чашечного типа могут применяться при частоте до 1 MHz и даже выше.

В качестве материала изоляторов должна быть использована керамика с низким значением угла диэлектрических потерь — радиофарфор, ультрафарфор, радиостеатит, смотря по рабочей частоте. Арматура изоляторов, изображенная на рис. 1-3, достаточно проста. Отмеченные крестиками места покрываются металлическим серебром путем горячего вжигания серебряной пасты. Коронирование на металлизированных частях и арматуре не наблюдается; при повышении напряжения сразу происходит искровое перекрытие вдоль поверхности диэлектрика.

Кривые рис. 4 показывают, как форма электрического поля сказывается на средних разрядных градиентах различных типов изоляторов. Графики и таблицы настоящей статьи составлены по результатам работы, проведенной научными сотрудниками лаборатории им. Смурова Ленинградского электротехнического института им. Ульянова (Ленина) Г. А. Муравьевой и А. В. Дмитриевым.

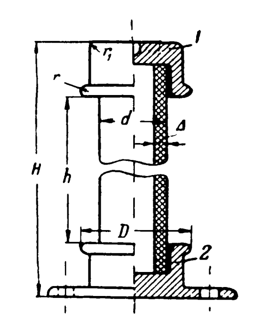


Рис. 1. Опорный изолятор.
1 — отверстие для винта; 2—заливка серой. Размеры—см. табл. 2.

Таблица 2

Характеристики опорных изоляторов

№ п/п.	Тип изолятора	Размеры, mm (по рис. 1)							Напряжение искрового перекрытия (в kV_{max}, при давлении 760 mm рт. ст. и температуре 20°C)						
									Постоянное напряжение		Частота 50 Hz		Частота 200—400 kHz		
									Влажность воздуха		Влажность воздуха		Непрерывный режим	Импульсы. 600 μ sec	
		H	h	D	d	r	r_1	Δ	80%	100%	80%	100%		$f_u = 150\ sec^{-1}$	$f_n = 20\ sec^{-1}$
1	0-1	175	100	70	40	5	2	5	75	70	70	65	65	70	70
2	0-2	225	150	70	40	5	2	5	>80	85	80	75	80	85	85

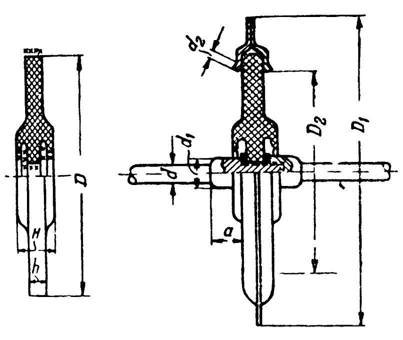


Рис. 2. Проходной изолятор дискового типа. Размеры—см. табл. 3.

Таблица 3

Характеристики проходных изоляторов (дискового типа)

№ п/п.	Тип изолятора	Размеры, mm (по рис. 2)									Напряжение искрового перекрытия (в kV_{max}, при давлении 760 mm рт. ст. и температуре 20°C)						
											Постоянное напряжение		Частота 50 Hz		Частота 200—400 kHz		
											Влажность воздуха		Влажность воздуха		Непрерывный режим	Импульсы 600 μ sec	
		D	D_1	D_2	H	h	d	d_1	d_2	a	80%	100%	80%	100%		$f_u = 150\ sec^{-1}$	$f_u = 20\ sec^{-1}$
1	ПД-1	115	160	105	17	10	6	14	3	15	50	40	45	35	45	50	50
2	ПД-2	195	240	180	35	15	16	24	5	24	65	50	60	45	60	65	65
3	ПД-3	260	320	240	40	20	16	30	5	30	80	65	75	60	75	80	80

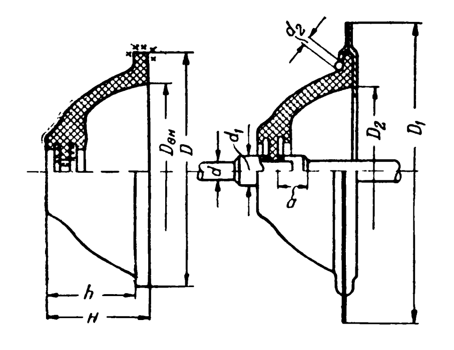


Рис. 3. Проходной изолятор чашечного типа. Размеры см. табл. 4.

Таблица 4

Характеристики проходных изоляторов чашечного типа

Тип изолятора	Размеры, mm (по рис. 3)										Напряжение искрового перекрытия (в kV_{max}, при давлении 760 mm рт. ст. и температуре 20°C)						
											Постоянное напряжение		Частота 50 Hz			Частота 200—400 kHz	
											Влажность воздуха		Влажность воздуха			Импульсы 600 μ sec	
	H	h	D	$D_{вн}$	D_1	D_2	d	d	d_1	d_2	80%	100%	80%	100%	Непрерывный режим	$f_u=150\ sec^{-1}$	$f_u=20\ sec^{-1}$
ПЧ-1	45	40	110	90	130	88	15	6	14	3	45	40	45	40	40	40	45
ПЧ-2	80	70	160	144	170	140	28	16	28	4	65	50	65	50	60	65	70
ПЧ-3	100	90	220	188	255	184	35	16	30	5	85	70	85	70	80	85	90

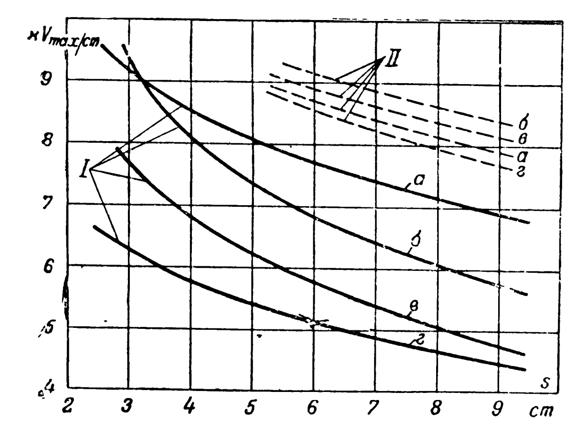


Рис. 4. Средние градиенты $\left(\frac{U}{s}\text{ в } kV_{max}/cm\right)$ искрового перекрытия типовых проходных изоляторов в зависимости от междуэлектродного расстояния s (считая по поверхности керамики) для различных видов испытательного напряжения.

I — изоляторы типа ПР: *II* — высокочастотные изоляторы типов ПД и ПЧ; *а* — частота 50 Hz; *б* — $f_u = 20\ sec^{-1}$; *в* — $f_u = 150\ sec^{-1}$; *г* — непрерывный высокочастотный режим.

При повышении частоты до 1 MHz разрядные напряжения рассмотренных конструкций в среднем уменьшаются на 10—15% от приведенных выше значений для частот 200 ÷ 400 kHz.

Применение промышленной частоты для испытаний высокочастотных изоляторов. Обычно заводы-изготовители, а часто и монтажные организации, не располагают испытательными установками высокой частоты, и нередко детали и конструкции испытываются напряжением промышленной частоты. Возникает вопрос, в какой мере равнозначны с точки зрения разрядных характеристик такого рода испытания.

Выше было указано, что влажность окружающей среды и конструктивные особенности изоляторов различным образом сказываются на разрядных напряжениях при низких и высоких частотах. Запас электрической прочности отдельной конструкции или установки в целом выбирается, исходя из условий эксплоатации. Кратность возможных перенапряжений или соответственно уровень электрической прочности изоляции при высокой частоте задается заранее. Для конструкций, монтированных на типовых изоляторах, опорных — реберных, проходных, типа ПР, или конических, величина испытательного напряжения при 50 Hz должна быть в 2 раза больше, чем испытательное напряжение при высокой частоте; при испытаниях необходимо учитывать относительную влажность воздуха. Для конструкций, использующих специальные типы высокочастотных изоляторов с высокой однородностью поля, испытательное напряжение при 50 Hz может быть принято равным 1,25 от заданных значений при высокой частоте.

Для изоляции, предназначаемой для импульсных напряжений высокой частоты, когда несущая высокая частота модулирована отдельными сигналами низкой частоты (в настоящей статье частота следования сигналов в sec^{-1} обозначена f_u), и между сигналами имеются интервалы, испытательное напряжение промышленной частоты может быть установлено равным испытательному напряжению для высокой частоты. Здесь, так же как и в предыдущем случае, должна быть принята во внимание влажность окружающей среды.

Литература

1. Н. П. Богородицкий и И. Д. Фридберг. Расчет и конструирование высоковольтных высокочастотных конденсаторов. Электричество, № 11, 1946.

2. Н. П. Богородицкий и И. Д. Фридберг. Расчет рабочих напряжений высоковольтных высокочастотных изоляторов. Информационно-технический бюллетень НКЭП, № 39, 1940.

◇ ◇ ◇

Экспериментальные исследования процесса коммутации электрических машин постоянного тока на модели

Кандидат техн. наук, доц. М. Ф. КАРАСЕВ

Томский электромеханический институт инженеров железнодорожного транспорта

Многие важные для целей практики вопросы теории коммутации вследствие исключительной сложности этого явления до сих пор еще не выяснены. Излагаются результаты исследования процесса коммутации на специальной модели, позволяющей изолированно изучать различные стороны этого процесса, в частности при отсутствии коммутирующего поля и взаимной индуктивности секций. Проведенные опыты доказывают, что характер влияния таких факторов, как индуктивность секций, ток нагрузки и скорость вращения коллектора при плотностях тока на щетку выше 6—5 А, совершенно не согласуется с классической теорией процесса коммутации, что обусловлено наличием ионных процессов в контактном слое щетки. В одном из ближайших номеров будет опубликована статья М. Ф. Карасева в природе щеточного контакта в машинах постоянного тока. По статьям намечено провести дискуссию.

Допущения, положенные в основу дифференциального уравнения классической теории коммутации, отмечались всегда, но при этом полагалось, что они не смогут в значительной мере повлиять на правильность выводов. Например, С. Н. Усатый [Л. 1] по поводу допущения постоянства удельного сопротивления щеточного контакта. принятого в классической теории, заявляет: «Принимая $\rho_к$ постоянным, мы делаем в теории коммутации первое приближение, но величина ошибки при принятом значении $\rho = \text{const}$ не так велика, чтобы изучение проблемы коммутации, основанным на этом допущении, признать ошибочным». По данному же вопросу М. П. Костенко [Л. 2] заявляет следующее: «Наиболее детально разработанной является классическая теория коммутации Арнольда, поэтому, несмотря на ряд ее условных допущений, большинство авторов принимает эту теорию за основу при анализе явлений коммутации».

Но существуют и другие взгляды на классическую теорию коммутации. Например, Нейкирхен [Л. 3] по данному вопросу пишет следующее: «Математическую теорию коммутации здесь никак нельзя было применить. Простое положение классической теории, именно, что все точки поверхности щетки дают одинаковый контакт, должно отпасть. Никогда нельзя принять, что контакт является непрерывным по времени. На место классической непрерывности вступает множество прерывностей, которые можно только измерить, но никогда нельзя математически вычислить заранее. Уже Арнольд на основании своих осциллографических наблюдений не раз указывал на этот факт и, покорившись судьбе, заявлял, что чем дольше заниматься проблемой коммутации, тем более невозможным оказывается аналитическое исследование процесса». Развивая теорию коммутации в точечном контакте, Нейкирхен в подтверждение своих взглядов, приводит заключение W. E. Stine, который установил на основе опытов, что в кривой падения напряжения ничто не меняется, если посредством срезывания частей щетки уменьшать поверхность контакта до десятых долей прежней. В дополнение к этому Нейкирхен ссылается на опыты по осциллографированию кривой тока коммутируемой секции, проведенные Арнольдом, из которых видно, что действительное время процесса коммутации всегда получалось меньшим, чем время, соответствующее ширине щетки в тангенциальном направлении.

Как видно из приведенных высказываний по данному вопросу, различие взглядов между учеными настолько велико, что в рамках классической теории их никак нельзя объединить. Такая противоречивость взглядов объясняется, главным образом, тем, что до последнего времени природа щеточного контакта коллекторных машин остается мало выясненной.

Нужно заметить, что явления коммутации в некоторых случаях достаточно четко объясняются на основе выводов классической теории, но немало и таких явлений, которые совершенно не укладываются в рамки данной теории. Особенно резкое расхождение явлений коммутации с теорией Арнольда имеет место в тех случаях, когда помимо контактной проводимости между щеткой и коллекторными пластинами добавляется еше и ионная проводимость.

При наличии ионизации щеточного контакта процесс протекает совершенно иначе, чем в ее отсутствии. Опыты, проведенные автором на специально сконструированном аппарате, со всей

несомненностью показывают резкую грань между явлениями коммутации без ионизации контакта щетки в сравнении с явлениями, происходящими при наличии ионизации. Если при отсутствии ионизации явления коммутации в какой-то мере еще увязываются с выводами классической теории, то после наступления ионизации процесс подчиняется уже другим законам, и выводы классической теории совершенно не совместимы с происходящими явлениями в цепи коммутируемой секции. Вот почему некоторые опытные данные подтверждают выводы классической теории и некоторые, наоборот, эти положения опровергают.

Следует заметить, что ионизация щеточного контакта, как показали опыты автора, появляется при возрастании плотности тока без всякого видимого искрения щетки и заметной она становится лишь тогда, когда нагрузка увеличивается в 2—4 раза в сравнении с той, при которой она в действительности появляется.

Некоторые основные положения классической теории коммутации. Уравнение для коммутируемой секции (рис. 1) с учетом только переходных сопротивлений контакта по 2-му закону Кирхгофа пишется в следующем виде:

$$e_к = -L\frac{di}{dt} = (i_a + i)\,R\,\frac{T}{T-t} - (i_a - i)R\frac{T}{t}. \quad (1)$$

Согласно классической теории, сопротивление щеточного контакта, входящее в данное уравнение, считается неизменным, удельное значение его по всей поверхности щетки одинаковым и независящим от плотности тока.

Решение данного уравнения приводит к заключению, что для получения конечной плотности тока в сбегающем крае щетки к концу процесса коммутации необходимо соблюдать неравенство $A = \frac{RT}{L} > 1$. Следовательно, если $A > 1$, то в щеточном контакте для сбегающего края будут обеспечены условия безыскровой работы — таков основной вывод классической теории. В действительности же удовлетворительная работа щетки может быть осуществлена и при гораздо меньших значениях члена A.

Вот что по данному вопросу пишет Рихтер [Л. 4]: „... все же основательны сомнения относительно того, насколько условие $A > 1$ правильно в общей форме, так как существуют машины, которые работают совершенно без искрения, хотя у них отношение $\frac{RT}{L}$ имеет величину порядка 0,1". По данному вопросу необходимо заметить, что в действительности, если процесс коммутации идет без ионизации шеточного контакта, что возможно, как показали опыты, лишь при плотностях тока порядка 1—2 А, то в этом случае далеко не вся поверхность щетки участвует в проведении тока, и сбегающий край щетки, подверженный более значительным вибрациям, чем набегающий, не принимает никакого участия в создании контакта. Если же ионизация имеет место, то в этом случае характер проводимости щеточного контакта настолько резко меняется, что действительный процесс совершенно не совместим с представлениями классической теории.

Устройство аппарата для исследования процесса коммутации. Процесс коммутации в машинах постоянного тока представляет собой чрезвычайно сложное явление, зависящее от весьма большого количества факторов и как математический анализ, так и опытные исследования этого вопроса наталкиваются на трудно преодолимые преграды.

Опытные исследования данного процесса на электрических машинах не дали исчерпывающих представлений о влиянии отдельных факторов на процесс коммутации, во-первых, потому, что при проведении опытов трудно было осуществить изменения только желаемых факторов, во-вторых, не все факторы можно было изменять. Для того чтобы получить возможность изменять только желаемые параметры и при том в достаточно широких пределах, автор решил перенести исследования на специально сконструированный аппарат, представляющий простейший двухпластиночный коллектор (рис. 2), к которому приключается неподвижная секция S, через контактные кольца K.

Для приближения к условиям, имеющим место в машинах постоянного тока, автор усложнил несколько коллектор такого аппарата, выполнив его из отдельных узких пластин с изоляционными промежутками, и разбил его на четыре изолированные друг от друга части, разместив щетки под углом 90°, благодаря чему за один оборот коллектора ток в секции будет меняться четыре раза (рис. 3).

Для уменьшения переходных сопротивлений между щетками и кольцами, которые в известной мере будут искажать процесс, на кольца были наложены медно-сетчатые щетки с боль-

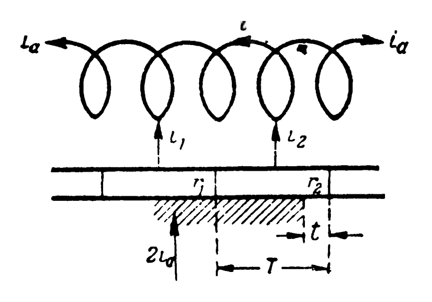


Рис. 1.

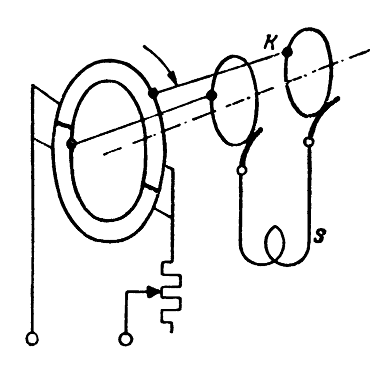


Рис. 2.

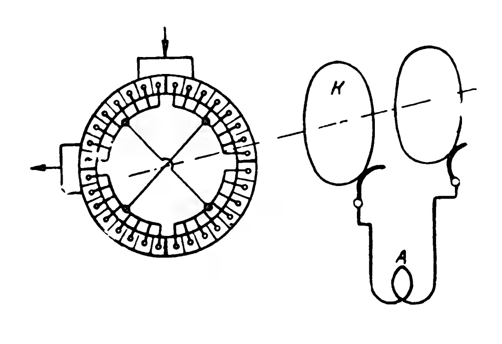


Рис. 3.

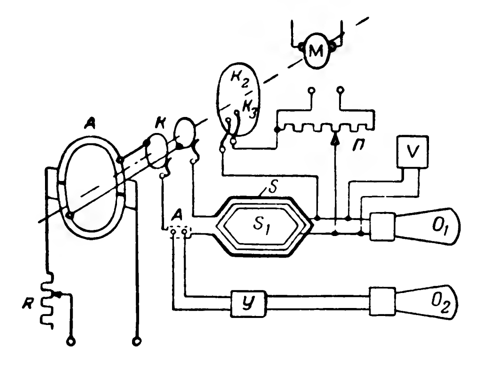


Рис. 4.

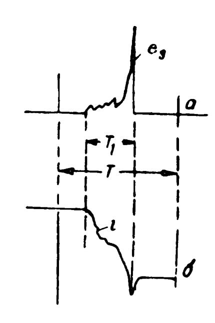


Рис. 6.

шой поверхностью контакта при значительном давлении на щетки. Учитывая большое влияние вибраций щетки на процесс коммутации, коллектор и щеточный аппарат были выполнены с большой тщательностью, благодаря чему амплитуда отклонения щеток в гильзах, замеренная при помощи индикаторов, не превышала 0,01 mm.

Идея исследования процесса коммутации на таком искусственном аппарате, на первый взгляд может показаться абсурдной. Такой аппарат не воспроизводит процесса коммутации машин постоянного тока в целом, ибо здесь отсутствуют поля коммутационной зоны от реакции якоря и дополнительных полюсов, а также не имеет место явление взаимной индукции коммутируемых секций, однако это, по нашему мнению, является преимуществом данного аппарата. При исследовании всякого сложного вопроса нужно исходить из простейших случаев. То же самое следует сказать и относительно изучения процесса коммутации. Поле коммутационной зоны может быть различным и по направлению и по распределению в пространстве.

Влияние его на процесс коммутации значительно проще учесть уже тогда, когда точно известна роль основных факторов. Вопрос о влиянии взаимной индуктивности секций на процесс коммутации представляет немаловажный практический интерес и исследуется в настоящее время автором на другом аппарате с неподвижным коллектором и вращающейся щеточной траверзой.

Принципиальная схема для проведения исследований на модели с вращающимся коллектором представлена на рис. 4, и общий вид установки дан на рис. 5. Как видно из рис. 4, коммутируемая секция S, заложенная в пазы неподвижного якоря, включена последовательно с шунтом A, от которого через ламповый усилитель $У$ напряжение передается на катодный осциллограф O_2. Осциллограф воспроизводит кривую тока исследуемой секции. Для осциллографирования э. д. с. самоиндукции рядом с коммутируемой секцией S расположена катушка S_1, провода от которой идут к катодному осциллографу O_1. С целью измерения максимальных значений э. д. с. самоиндукции параллельно осциллографу O_1 включен электронный пик-вольтметр V. Для получения возможности координировать кривые тока и э. д. с. коммутируемой секции

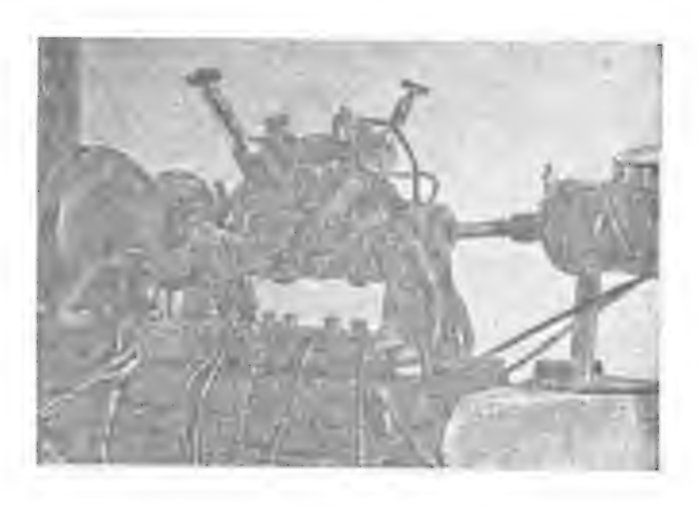


Рис. 5.

по отношению к щетке на валу коллектора установлен диск K_2, выполненный из изоляционного материала, на котором расположены две узкие металлические пластины, посредством которых контакты замыкаются на чрезвычайно короткое время. Эти пластины на диске расположены таким образом, что одна из них замыкает контакт K_3 в момент начала перекрытия секции щеткой, а другая в момент размыкания ее. Контакты в замкнутом состоянии передают напряжение с потенциометра $П$ на катодный осциллограф O_1, благодаря чему электронный луч на экране осциллографа вычерчивает две вертикальные черты, между которыми располагается кривая э. д. с. самоиндукции (рис. 6,*а*). Такие же линии можно нанести и на кривую тока (рис. 6, *б*).

Исследование влияния параметров, входящих в уравнение классической теории, на процесс коммутации. На рис. 7 представлены полученные из опыта кривые $e_{sm}=f(I)$ при $n=900$ об/мин для трех контрастных сортов щеток — твердой угольной, графитовой мягкой и меднографитовой при различных числах витков секции. Согласно классической теории данная зависимость должна представляться при условии $\frac{RT}{L}>1$ прямой линией, проходящей через начало координат под некоторым углом к

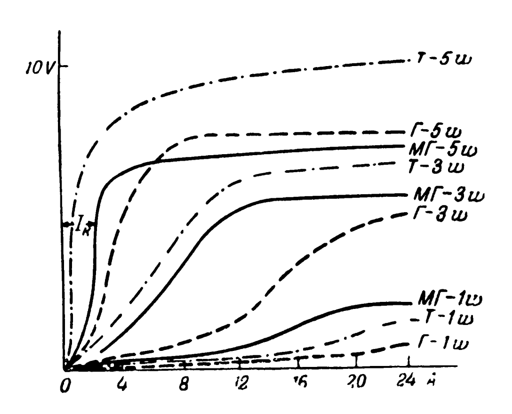


Рис. 7.

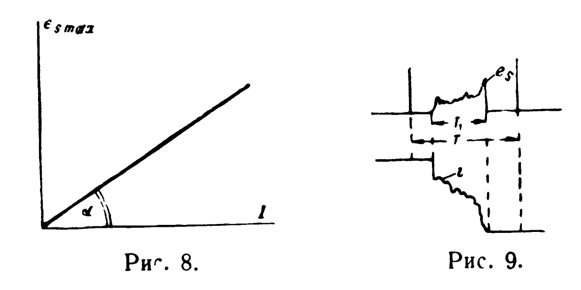


Рис. 8. Рис. 9.

осям. Для всех нанесенных кривых в нашем случае $\frac{RT}{L}$ значительно больше единицы, и мы вправе были бы ожидать закона изменения e_{sm} согласно рис. 8. В действительности же примерно такой характер изменения e_{sm} мы получим лишь для одновитковых секций и то при сравнительно малых токах. При большем числе витков закон изменения e_{sm} становится совершенно иным.

Мы видим, что при очень малых токах нарастание e_{sm} идет сравнительно медленно, затем при некотором „критическом" токе $I_к$ быстро начинает возрастать, и, достигнув предельного значения, остается практически без изменения.

При рассмотрении данных кривых невольно напрашиваются два вопроса: 1) чем объясняется резкое увеличение e_{sm} при токе $I_к$ и 2) почему при дальнейшем увеличении тока e_{sm} почти не изменяется. Ответ легко получить, если при снятии данных кривых наблюдать за экраном осциллографа.

Первоначально при малых токах кривая e_s не имеет резких выступов и по мере увеличения тока еле заметно поднимается вверх. Но как только ток достигнет значения $I_к$, в кривой появляется резко выраженный пик, соответствующий окончанию процесса коммутации, причем ординаты всех точек кривой в других частях заметно опускаются. При дальнейшем увеличении тока пик кривой e_s по высоте практически не меняется, но при этом его основание уширяется.

По всей вероятности, при малых токах мы имеем дело только с контактной проводимостью, причем следует заметить, что не вся поверхность щетки в тангенциальном направлении принимает участие в проведении тока, как это видно из рис. 6. В зависимости от упругости щетки и степени пришлифовки $\frac{T_1}{T}$ колеблется в пределах от 0,2 до 0,7. Нужно полагать, что при достижении критического тока секцией в зоне сбегающего края щетки под действием искры создается ионизированное пространство, которое обладает значительно большей проводимостью, чем вся остальная часть поверхности щетки. Благодаря наличию ионизации сбегающего края щетки основной спад тока, как это видно из кривой тока коммутируемой секции (рис. 6,*б*), сосредотачивается именно здесь, и поэтому месту ионизации щеточного контакта соответствует резко выраженный пик в кривой e_s (рис. 6, *а*).

При дальнейшем увеличении тока e_{sm} практически остается неизменной, но в кривой e_s при этом замечается некоторое уширение пика, что свидетельствует об увеличении ионизированного пространства, благодаря чему $\frac{di}{dt}$ не изменяется. Как правило, при возрастании нагрузки отношение $\frac{T_1}{T}$ увеличивается и пик в кривой e_s выносится ближе к сбегающему краю щетки.

Необходимо отметить следующий интересный опыт, подтверждающий скачкообразный характер ионизации щеточного контакта. Если установить ток в коммутируемой секции близким к «критическому» и наблюдать за экраном осциллографа, то первоначально мы увидим кривые согласно рис. 9. Спустя некоторое время с экрана осциллографа на один миг все исчезает, и тут же появляются кривые с резко выраженными пиками. В этом случае причиной начала ионизации щеточного контакта, несомненно, является возросшая температура коллектора. Относительно влияния фактора времени на процесс коммутации А. И. Москвитин в предисловии к переводу монографии Нейкирхена пишет: «Стержневым вопросом книги является вопрос о причинах изменения условий коммутации по времени. Этот вопрос вообще является решающим для возможности применения научного анализа в области коммутации».

По данному вопросу на основе проведенных многочисленных опытов можно заметить, что фактором времени при исследовании процесса коммутации пренебрегать, безусловно, нельзя.

В зависимости от случайных причин, меняющихся по времени, характер процесса коммутации несколько изменяется, но все же по кривой e_s, фиксируемой на экране осциллографа, и по кривой $e_{sm}=f(i)$, снятой при помощи пик-вольтметра, можно определить, какой тип щетки испытывается, если при этом не произошло заметных изменений факторов механической природы.

Следует отметить еще одно исключительно интересное явление, относящееся к вопросу ионизации щеточного контакта. При увеличении нагрузочного тока e_{sm} изменяется по кривой I (рис. 10).

Если же довести контакт до состояния ионизации, а затем уменьшить ток, то e_{sm} будет изменяться по кривой *II*, расположенной влево от первоначальной. Мы видим здесь своеобразный „гистерезис" процесса ионизации, который в некоторых случаях может явиться причиной искрения при сравнительно небольших нагрузках, если перед этим машина была доведена до нагрузки, обусловившей искрение.

Для того чтобы убедиться в ионизации щеточного контакта при каких угодно малых индуктивностях секции, автор проводил опыты с одновитковой секцией, вынутой из пазов стального якоря. И в этом случае в кривой e_s появлялся пик, хотя и при несколько больших токах. В момент появления пика, как это было и при всех других опытах, никакого внешнего искрения не было заметно. Начиная с этого момента, нужно в несколько раз увеличить ток, прежде чем можно будет заметить мельчайшие искры под сбегающим краем щетки, что, как нам кажется, и дает полное основание заключить, что во всех машинах постоянного тока при сколько-нибудь значительных нагрузках природа щеточного контакта является ионной. При появлении же наружного искрения пиковые значения e_{sm} слегка убывают и кривая $e_{sm} f(I)$ загибается едва заметно книзу (рис. 10).

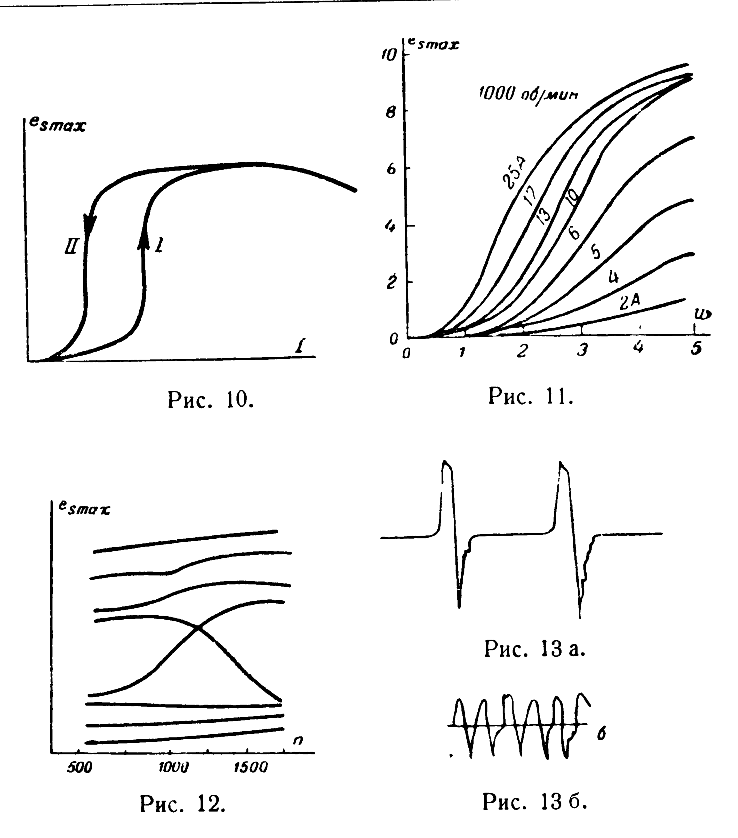


Рис. 10.

Рис. 11.

Рис. 12.

Рис. 13 а.

Рис. 13 б.

На рис. 11 представлены кривые $e_{sm} = f(w)$ при $n = \text{const}$ и $I = \text{const}$, где w — число витков секции. Кривые сняты для твердой угольной щетки при $n = 1\,000$ об/мин. На основе классической теории кривые должны соответствовать уравнению $e_{sm} = kw^2$ и графически представлены кривыми параболического вида. В действительности же восходящие ветви, напоминающие параболу, мы получили лишь для сравнительно малых токов. При значительных же токах, обусловливающих ионизацию щеточного контакта, изгиб кривой получается обратным.

Для выяснения влияния скорости коллектора на процесс коммутации нами были поставлены опыты с различными марками щеток при различных значениях тока. Скорость коллектора изменялась в пределах от 500 до 1 500 об/мин. Согласно положениям классической теории уравнение $e_{sm} = f(n)$ при $I = \text{const}$ должно представляться прямой, проходящей через начало координат. В действительности же лишь для очень малых токов мы получили картину, отдаленно напоминающую такую закономерность (рис. 12). При сколько-нибудь значительных токах эта зависимость представляется почти прямыми, параллельными оси абсцисс. Следует заметить, что, если коммутация происходит с токами, близкими к критическому, то при этом увеличение скорости коллектора в некоторых случаях способствует ионизации контакта. Но было отмечено немало и таких случаев, когда в контакте, получившем ионизацию, при дальнейшем увеличении скорости коллектора ионизация исчезала.

Как видно из приведенных кривых, влияние скорости коллектора на процесс коммутации вовсе не соответствует представлениям классической теории. В широком диапазоне изменения скорости коллектора в кривой e_s не происходит заметных изменений, а если они и наступают, то это связано с механическими вибрациями щетки. Ионизация щеточного контакта может исчезнуть, если при увеличении скорости коллектора работа щетки в механическом отношении становится спокойнее.

Щеточный контакт. Чтобы выяснить, в какой мере выводы относительно процесса коммутации, сделанные на основе опытов, проведенных на специальном аппарате, соответствуют реальному процессу коммутации в электрических машинах, автор снял при помощи дополнительной щетки потенциальные коллекторные диаграммы. Напряжение между рабочей щеткой и вспомогательной, перемещаемой по коллектору в зоне расположения рабочей щетки, было передано через ламповый усилитель на осциллограф и пик-вольтметр. Характер кривых падения напряжения между коллектором и рабочей щеткой иллюстрирует осциллограмма, представленная на рис. 13а, снятая для сбегающего края щетки. Для сравнения на рис. 13б приведена осциллограмма падения напряжения в сбегающем же крае щетки, полученная A. Railing.

Судя по очертанию кривых, они почти не отличаются друг от друга. Разница заключается только в том, что в действительной машине количество размыканий секций за один оборот коллектора соответствует числу коллекторных пластин, в аппарате же автора за один оборот коллектора данный процесс совершается только четыре раза, благодаря чему между периодическими кривыми в осциллограмме 13,*а* имеют место значительные промежутки.

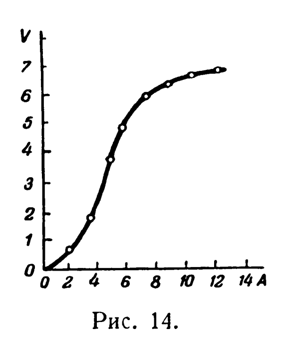


Рис. 14.

Необходимо отметить, что амплитуда колебания падения напряжения между щеткой и коллектором при перемещении вспомогательной щетки резко меняются. Наибольшие падения напряжения соответствуют сбегающему краю щетки в том именно месте, для которого соответствует пик в кривой e_s. Если же в кривой e_s имеется пик и в набегающей части, то и для набегающего края щетки осциллограф и пик-вольтметр фиксируют значительные увеличения падения напряжения. Данное явление в щеточном контакте отмечено еще Арнольдом [Л. 5], который по этому вопросу писал: «В моменты времени, когда секция или выходит из процесса коммутации, или же набегающий край щетки производит замыкание ее, между ламелями, к которым приключена секция, и щеткой возникают большие напряжения». Точно такое же явление в контактном слое щетки было установлено инж. J. N. van der Ley и И. Л. Ла-Кур [Л. 6]. Ла-Кур отмечает, что «...измеренные величины ΔU были значительны даже при небольших плотностях тока».

Таким образом, проведенные опыты по осциллографированию падения напряжения между щеткой и коллектором со всей очевидностью доказывают, во-первых, возможность исследования процесса коммутации на искусственном аппарате, а во-вторых, опыты приводят к убеждению, что и в электрических машинах, в той мере, в какой и там в щеточном контакте обнаруживаются весьма ограниченные по площади места повышенных падений напряжения по отношению к коллектору, природа щеточного контакта даже при относительно небольших нагрузках является ионной.

Следует отметить, что как пики в кривых e_s и i, так и повышенные падения напряжения между щеткой и коллектором появляются одновременно и соответствуют одному и тому же месту в щеточном контакте. Для того чтобы установить связь между e_s и падением напряжения между сбегающим краем щетки и коллектором, автор снял кривую $\Delta U = f(I)$, пользуясь усилителем и пик-вольтметром. На рис. 14 приведена кривая, полученная для твердой щетки при $n = 1\,000$ об/мин. Как видно из данного рисунка, кривая весьма напоминает кривую $e_{sm} = f(I)$. Пользуясь кривой, можно установить, при каких нагрузках возникает ионизация щеточного контакта, а следовательно, если снимать подобные кривые для реальных электрических машин, то можно и для них выяснить условия, при которых возникает ионизация контакта, нарушающая основные положения, принятые в классической теории коммутации.

Выводы. 1. Искусственный аппарат, примененный автором для исследования процесса коммутации, дает возможность выяснить влияние отдельно взятых факторов на процесс коммутации в электрических машинах.

2. В щеточном контакте электрических машин при сколько-нибудь значительных нагрузках возникает ионный процесс.

3. При возникновении ионного процесса в щеточном контакте основные положения классической теории коммутации неверны.

Литература

1. С. Н. Усатый. Электрические машины, 1936.
2. М. П. Костенко. Электрические машины, 1944.
3. Нейкирхен. Угольные щетки и причины непостоянства условий коммутации машин постоянного тока. Перевод с немецкого А. И. Москвитина.
4. Р. Рихтер. Электрические машины, т. 1, 1935.
5. E. Arnold. Die Gleichstrommaschine, 1906.
6. Э. Арнольд и И. Л. Ла-Кур. Машины постоянного тока, т. 1, 1931.

◇ ◇ ◇



Номографический метод построения рабочих характеристик однофазных асинхронных микродвигателей с расщепленной фазой

Доктор техн. наук, проф. Ю. С. ЧЕЧЕТ

Московский энергетический институт им. Молотова

Дан метод расчета характеристик асинхронных микродвигателей с расщепленной фазой (с пусковой емкостью, с пусковым сопротивлением и конденсаторных), значительно упрощающий трудоемкие математические операции с комплексными величинами. Все расчеты базируются на данных опытов к. з. и холостого хода. Попутно разработаны некоторые вопросы теории, недостаточно или вовсе не освещенные в литературе, в частности расчет потерь в стали при эллиптическом поле.

Современные однофазные асинхронные микродвигатели с расщепленной фазой выполняются почти исключительно в одном из трех следующих вариантов: a) двигатели конденсаторные; b) с конденсаторным пуском; c) двигатели с реостатным пуском (с добавочным сопротивлением в цепи пусковой фазы или с увеличенным сопротивлением пусковой фазы).

На рис. 1 показана наиболее общая схема двигателя с расщепленной фазой. Из этой схемы легко получить все три указанные выше варианта. В вариантах a и b R_c обозначает активное сопротивление конденсатора (характеризующее его потери), в варианте c внешнее пусковое сопротивление. Кроме того, в варианте c отсутствует конденсатор, а в варианте a нет центробежного выключателя S, т. е. конденсатор C остается в схеме и при нормальном режиме работы. Во многих случаях в варианте a емкости при пуске в ход и при рабочем режиме различны, что достигается путем применения второго конденсатора, включаемого на время пуска параллельно к первому, а затем отключаемого центробежным выключателем, либо промежуточного автотрансформатора с регулируемым коэффициентом трансформации.

Теория однофазного асинхронного двигателя разработана в настоящее время достаточно полно. Для этой цели использованы и метод поперечного поля, и метод полей, вращающихся в разные стороны, и метод симметричных составляющих. Существуют и методы построения характеристик этих двигателей как графические, так и аналитические. Следует, однако, отметить, что графические методы исследования (с помощью круговых диаграмм) для микродвигателей (двигателей мощностью до 500 W) мало пригодны, так как они не могут учесть всех специфических особенностей их работы, в частности изменения потерь в стали и механических в зависимости от скорости вращения. Аналитические методы имеют тот недостаток, что требуют большой и весьма трудоемкой вычислительной работы даже в том случае, если, как это принято во всех работах, вышедших до настоящего времени, пренебрегать изменением потерь в стали и механическими, что совершенно недопустимо для микродвигателей. Можно, конечно, пойти по пути непосредственного получения характеристик машины при помощи какого-либо тормозного устройства, исключающего как будто все ошибки, связанные с применением графических и аналитических методов расчета. Однако, опыт автора показывает, что для получения действительно надежных результатов совершенно необходимыми условиями являются не только высокая точность измерительной аппаратуры, но и уменье экспериментатора обнаружить источники ошибок и, если они не могут быть устранены, учесть их влияние. Это касается в первую очередь погрешностей, вносимых наличием в схеме измерительных приборов. С этой точки зрения сведение количества изме-

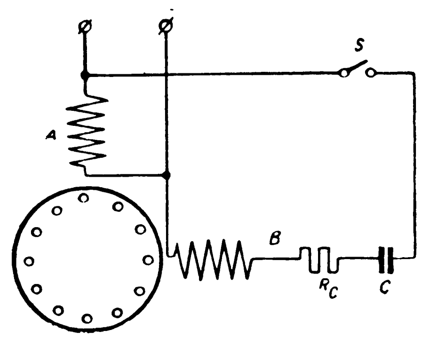


Рис. 1. Общая схема двигателя с расщепленной фазой.
A — рабочая обмотка статора; B — пусковая; C — конденсатор; S — центробежный выключатель, отключающий пусковую цепь от сети при скорости 75—85% от номинальной.

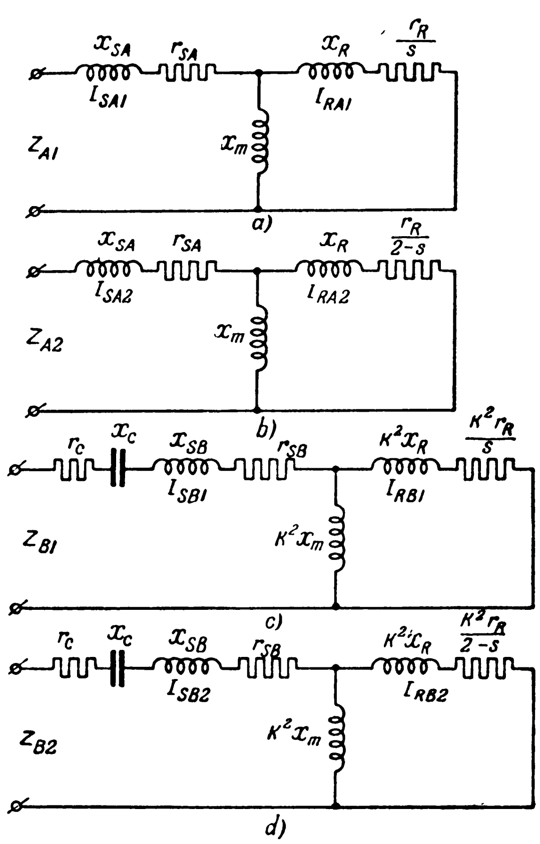


Рис. 2. Эквивалентные схемы для токов.
a, *в* — токи прямой и обратной последовательности фазы *A*; *c* и *d* — то же фазы *B*.

рений к минимуму является крайне желательным. Наконец, метод непосредственного торможения исключается в случае необходимости найти поведение проектируемого двигателя, еще не существующего в виде опытного образца. Само собой разумеется, что тщательно поставленное в научной лаборатории непосредственное измерение остается единственным критерием для оценки эффективности того или иного косвенного метода.

Автор поставил себе задачу обосновать такой метод аналитического построения характеристик однофазных асинхронных микродвигателей, который, во-первых, учитывал бы некоторые особенности однофазных машин, не нашедшие отражения в существующих методах, а во-вторых, позволил бы свести до минимума вычислительную работу. В основу предлагаемого метода положена теория симметричных составляющих. Единственными допущениями являются: постоянство магнитной проницаемости стали, отсутствие высших гармоник в кривой поля, расположение рабочей и пусковой обмоток под углом 90 электрических градусов. Если в качестве рабочей обмотки используются две фазы трехфазной машины, то последнее условие все же остается в силе, так как две обмотки, соединенные последовательно и расположенные под углом 120°, могут быть заменены одной с числом витков в $\sqrt{3}$ раз большим числа витков каждой фазы. Обозначения, принятые в настоящей работе, приведены в приложении I.

Характеристики двигателя с длительно включенной пусковой фазой, содержащей емкость и активное сопротивление. Все уравнения этого раздела применимы как для конденсаторного двигателя, так и для двигателя с добавочным сопротивлением или с повышенным сопротивлением пусковой обмотки. В первом случае $X_c \neq 0$ и $R_c \neq 0$, во втором случае $X_c = 0$ и $R_c \neq 0$, в третьем случае $X_c = 0$ и $R_c = 0$.

Токи. На рис. 2 показаны эквивалентные схемы для токов. Сопротивление намагничивающей ветви X_m полагаем чисто индуктивным, т. е. пока не учитываем потерь в стали. Способ учета потерь в стали будет показан в дальнейшем. Тогда токи отдельных эквивалентных схем будут равны [1]:

$$\dot{I}_{SA1} = \dot{U}\frac{Z_{B2} - jkZ_{A2}}{Z_{A1}Z_{B2} + Z_{A2}Z_{B1}}, \quad (1)$$

$$\dot{I}_{SA2} = \dot{U}\frac{Z_{B1} + jkZ_{A1}}{Z_{A1}Z_{B2} + Z_{A2}Z_{B1}}, \quad (2)$$

$$\dot{I}_{SB1} = \frac{j}{k}\dot{I}_{SA1} = \dot{U}\frac{Z_{A2} + \frac{j}{k}Z_{B2}}{Z_{A1}Z_{B2} + Z_{A2}Z_{B1}}, \quad (3)$$

$$\dot{I}_{SB2} = -\frac{j}{k}\dot{I}_{SA2} = \dot{U}\frac{Z_{A1} - \frac{j}{k}Z_{B1}}{Z_{A1}Z_{B2} + Z_{A2}Z_{B1}}. \quad (4)$$

Действительные токи в фазах

$$\dot{I}_{SA} = \dot{I}_{SA1} + \dot{I}_{SA2} = \dot{U}\frac{(Z_{B1} + Z_{B2}) + jk(Z_{A1} - Z_{A2})}{Z_{A1}Z_{B2} + Z_{A2}Z_{B1}}, \quad (5)$$

$$\dot{I}_{SB} = \dot{I}_{SB1} + \dot{I}_{SB2} = \dot{U}\frac{(Z_{A1} + Z_{A2}) - \frac{j}{k}(Z_{B1} - Z_{B2})}{Z_{A1}Z_{B2} + Z_{A1}Z_{B1}}. \quad (6)$$

Ток в линии

$$\dot{I}_S = \dot{I}_{SA} + \dot{I}_{SB} = \dot{U}\frac{(Z_{A1} + Z_{A2} + Z_{B1} + Z_{B2}) + j\left(kZ_{A1} - kZ_{A2} - \frac{1}{k}Z_{B1} + \frac{1}{k}Z_{B2}\right)}{Z_{A1}Z_{B2} + Z_{A2}Z_{B1}}. \quad (7)$$

Полные сопротивления эквивалентных схем

$$Z_{A1} = Z_{SA} + Z'_{RA1} = (R_{SA} + R'_{RA1}) + j(X_{SA} + X'_{RA1}) = R_{A1} + jX_{A1}, \quad (8)$$

$$Z_{A2} = Z_{SA} + Z'_{RA2} = (R_{SA} + R'_{RA2}) + j(X_{SA} + X'_{RA2}) = R_{A2} + jX_{A2}, \quad (9)$$

$$Z_{B1} = Z_{SB} + Z'_{RB1} = (R_{SB} + R_C + R'_{RB1}) + j(X_{SB} - X_C + X'_{RB1}) = R_{B1} + jX_{B1}, \quad (10)$$

$$Z_{B2} = Z_{SB} + Z'_{RB2} = (R_{SB} + R_C + R'_{RB2}) + j(X_{SB} - X_C + X'_{RB2}) = R_{B2} + jX_{B2}, \quad (11)$$

[1] Вывод уравнений (1) и (2) дан в приложении II.

где сопротивления разветвлений

$$Z'_{RA1} = \frac{X_m^2 \frac{R_R}{s}}{\left(\frac{R_R}{s}\right)^2 + \left(X_m + X_R\right)^2} + j\frac{X_m\left(\frac{R_R}{s}\right)^2 + X_m X_R (X_m + X_R)}{\left(\frac{R_R}{s}\right)^2 + (X_m + X_R)^2} = R'_{RA1} + jX'_{RA1}, \quad (12)$$

$$Z'_{RA2} = \frac{X_m^2 \frac{R_R}{2-s}}{\left(\frac{R_R}{2-s}\right)^2 + (X_m + X_R)^2} + j\frac{X_m\left(\frac{R_R}{2-s}\right)^2 + X_m X_R (X_m + X_R)}{\left(\frac{R_R}{2-s}\right)^2 + (X_m + X_R)^2} = R'_{RA2} + jX'_{RA2}, \quad (13)$$

$$Z'_{RB1} = k^2 Z'_{RA1} = k^2 R'_{RA1} + jk^2 X'_{RA1} = R'_{RB1} + jX'_{RB1}, \quad (14)$$

$$Z'_{RB2} = k^2 R'_{RA2} + jk^2 X'_{RA2} = R'_{RB2} + jX'_{RB2}. \quad (15)$$

Уравнения (1)—(15) позволяют определить все токи при любом скольжении, если известны параметры машины. Большая часть этих уравнений общеизвестна и содержится в работах многих авторов. Однако, легко видеть, что практическое использование этих выражений связано с трудоемкой работой, в особенности если характеристики двигателя рассчитываются для 10—12 значений скольжения, что совершенно необходимо для построения кривых. Кроме того, громоздкость расчета может явиться новым источником ошибок. Все это в конечном счете приводит к тому, что метод становится практически неприемлемым.

Значительное упрощение расчета может быть получено путем применения номограмм, позволяющих быстро и с достаточной точностью (во всяком случае не меньшей, чем при пользовании нормальной логарифмической линейкой) подсчитывать сложные выражения, входящие в уравнения параметров. Однако, здесь возникает новое затруднение, заключающееся в том, что параметры машин различного типа, различной мощности и скорости вращения могут изменяться в широких пределах. Это обстоятельство не позволит построить достаточно компактные номограммы, пригодные для машин различных типов. Для устранения этого препятствия автор предлагает вести расчет в относительных единицах, что значительно сужает пределы вариации параметров. Наиболее удобной в данном случае оказывается система, в которой за единицу напряжения принято номинальное напряжение $U_н$ и за единицу сопротивления—индуктивное сопротивление намагничивающей ветви X_m. Тогда единицей тока будет ток $\frac{U_н}{X_m}$, единицей мощности—мощность $\frac{U_н^2}{X_m}$ и т. д. Обозначая все величины в относительных единицах соответственными малыми буквами, получим из уравнений (1)—(15) следующие выражения[2]:

$$\dot{i}_{SA1} = \frac{z_{B2} - jkz_{A2}}{z_{A1} z_{B2} + z_{A2} z_{B1}}, \quad (1')$$

$$\dot{i}_{SA2} = \frac{z_{B1} + jkz_{A1}}{z_{A1} z_{B2} + z_{A2} z_{B1}}, \quad (2')$$

$$z_{A1} = (r_{SA} + r'_{RA1}) + j(x_{SA} + x'_{RA1}) = r_{A1} + jx_{A1}, \quad (8')$$

$$z_{A2} = (r_{SA} + r'_{RA2}) + j(x_{SA} + x'_{RA2}) = r_{A2} + jx_{A2}, \quad (9')$$

$$z_{B1} = (r_{SB} + r_C + r'_{RB1}) + j(x_{SB} - x_C + x'_{RB1}) = r_{B1} + jx_{B1}, \quad (10')$$

$$z_{B2} = (r_{SB} + r_C + r'_{RB2}) + j(x_{SB} - x_C + x'_{RB2}) = r_{B2} + jx_{B2}, \quad (11')$$

$$z'_{RA1} = \frac{\frac{r_R}{s}}{\left(\frac{r_R}{s}\right)^2 + (1 + x_R)^2} + j\frac{\left(\frac{r_R}{s}\right)^2 + x_R(1 + x_R)}{\left(\frac{r_R}{s}\right)^2 + (1 + x_R)^2} = r'_{RA1} + jx'_{RA1}, \quad (12')\ (Н1)\ (Н2)$$

$$z'_{RA2} = \frac{\frac{r_R}{2-s}}{\left(\frac{r_R}{2-s}\right)^2 + (1 + x_R)^2} + j\frac{\left(\frac{r_R}{2-s}\right)^2 + x_R(1 + x_R)}{\left(\frac{r_R}{2-s}\right)^2 + (1 + x_R)^2} \approx \frac{\frac{r_R}{2-s}}{(1 + x_R)^2} + j\frac{\left(\frac{r_R}{2-s}\right)^2 + x_R(1 + x_R)}{(1 + x_R)^2} = r'_{RA2} + jx'_{RA2}, \quad (13')\ (Н3)\ (Н4)$$

$$z'_{RB1} = k^2 z'_{RA1} = k^2 r'_{RA1} + jk^2 x'_{RA1} = r'_{RB1} + jx'_{RB1}, \quad (14')$$

$$z'_{RB2} = k^2 z'_{RA2} = k^2 r'_{RA2} + jk^2 x'_{RA2} = r'_{RB2} + jx'_{RB2}. \quad (15')$$

Подставляя (8')—(11') в (1') и (2') и исключая j из знаменателя, получим токи:

$$\dot{i}_{SA1} = \frac{(r_{B2} + kx_{A2})Q + (x_{b2} - kr_{A2})S}{Q^2 + S^2} + j\frac{(x_{B2} - kr_{A2})Q - (r_{B2} + kx_{A2})S}{Q^2 + S^2} = i'_{SA1} + ji''_{SA1}, \quad (16)$$

$$\dot{i}_{SA2} = \frac{(r_{F1} - kx_{A1})Q + (x_{B1} + kr_{A1})S}{Q^2 + S^2} + j\frac{(x_{B1} + kr_{A1})Q - (r_{B1} - kx_{A1})S}{Q^2 + S^2} = i'_{SA2} + ji''_{SA2}, \quad (17)$$

или, обозначая

$$r_{B2} + kx_{A2} = a_1, \quad (18)$$

$$x_{B2} - kr_{A2} = a_2, \quad (19)$$

$$r_{B1} - kx_{A1} = a_3, \quad (20)$$

$$x_{B1} + kr_{A1} = a_4, \quad (21)$$

[2] Если с правой стороны уравнения рядом с его порядковым номером стоят взятые в скобку буква Н и число, то это обозначает, что для данного выражения автором составлена номограмма под номером, совпадающим с числом.

находим:

$$i'_{SA1}=\frac{a_1Q}{Q^2+S^2}+\frac{a_2S}{Q^2+S^2}, \quad (22)\ (H5)$$

$$i''_{SA1}=\frac{a_2Q}{Q^2+S^2}-\frac{a_1S}{Q^2+S^2}, \quad (23)\ (H5)$$

$$i'_{SA2}=\frac{a_3Q}{Q^2+S^2}+\frac{a_4S}{Q^2+S^2}, \quad (24)\ (H5)$$

$$i''_{SA2}=\frac{a_4Q}{Q^2+S^2}-\frac{a_3S}{Q^2+S^2}, \quad (25)\ (H5)$$

$$i_{SA1}=\sqrt{i'^2_{SA1}+i''^2_{SA1}}, \quad (H6)$$

$$i_{SA2}=\sqrt{i'^2_{SA2}+i''^2_{SA2}}, \quad (H6)$$

где

$$Q=r_{A1}r_{B2}+r_{A2}r_{B1}-x_{A1}x_{B2}-x_{A2}x_{B1}, \quad (26)$$

$$S=r_{A1}x_{B2}+r_{B2}x_{A1}+r_{A2}x_{B1}+r_{B1}x_{A2}. \quad (27)$$

Тогда

$$i'_{SB1}=-\frac{i''_{SA1}}{k}, \quad (28)$$

$$i''_{SB1}=\frac{i'_{SA1}}{k}, \quad (29)$$

$$i'_{SB2}=\frac{i'_{SA2}}{k}, \quad (30)$$

$$i''_{SB2}=-\frac{i'_{SA2}}{k}, \quad (31)$$

$$i'_{SA}=i'_{SA1}+i'_{SA2}, \quad i''_{SA}=i''_{SA1}+i''_{SA2}, \quad (32)$$

$$i'_{SB}=i'_{SB1}+i'_{SB2}, \quad i''_{SB}=i''_{SB1}+i''_{SB2}, \quad (33)$$

$$i'_{S}=i'_{SA}+i'_{SB}, \quad i''_{S}=i''_{SA}+i''_{SB}. \quad (34)$$

Электромагнитная мощность определяется как разность электромагнитных мощностей прямой и обратной последовательностей

$$p_{12}=i^2_{RA1}\frac{r_R}{s}+i^2_{RB1}\frac{k^2r_R}{s}-i^2_{RA2}\frac{r_R}{2-s}-i^2_{RB2}\frac{k^2r_R}{2-s}$$

или, так как

$$i^2_{RB1}=\frac{i^2_{RA1}}{k^2}, \quad i^2_{RB2}=\frac{i^2_{RA2}}{k^2},$$

то

$$p_{12}=2i^2_{RA1}\frac{r_R}{s}-2i^2_{RA2}\frac{r_R}{2-s}.$$

В принятых нами эквивалентных схемах (рис. 2) активное сопротивление в намагничивающей ветви отсутствует и, очевидно, мощность, выделяемая при прохождении тока i_{RA1} через сопротивление $\frac{r_R}{s}$, равна мощности, выделяемой при прохождении тока i_{SA1} через эквивалентное сопротивление разветвления r'_{RA1}. То же справедливо и по отношению к схеме обратной последовательности. Тогда электромагнитная мощность или момент в синхронных ваттах

$$p_{12}=p'_{12}-p''_{12}=2i^2_{SA1}r'_{RA1}-2i^2_{SA2}r'_{RA2}. \quad (35)\ (H7)$$

Потери в стали. Потери в стали статора создаются полями прямой и обратной последовательности, вращающимися относительно статора с одинаковой постоянной скоростью. При неподвижном роторе полные потери в стали статора [2]

$$p_{CS_k}=p_{CS1_k}+p_{CS2_k}. \quad (36)$$

Потери от прямого и обратного поля относятся как квадраты индукций или как квадраты э. д. с. прямой и обратной последовательности:

$$\frac{p_{CS1_k}}{p_{CS2_k}}=\frac{e^2_{1k}}{e^2_{2k}}.$$

Согласно эквивалентным схемам рис. 2

$$e_{1k}=i_{SA1_k}\sqrt{r'^2_{RA1_k}+x'^2_{RA1_k}}=i_{SA1_k}z'_{RA1_k}, \quad (37)$$

$$e_{2_k}=i_{SA2_k}\sqrt{r'^2_{RA2_k}+x'^2_{RA2_k}}=i_{SA2_k}z'_{RA2_k}. \quad (38)$$

Так как при $s=1$ $z'_{RA1_k}=z'_{RA2_k}$, то

$$\frac{p_{CS1_k}}{p_{CS2_k}}=\left(\frac{i_{SA1_k}}{i_{SA2_k}}\right)^2=k_{ik}. \quad (39)\ (H8)$$

Решая совместно (36) и (39), найдем:

$$p_{CS1_k}=p_{CS_k}\frac{k_{ik}}{1+k_{ik}},$$

$$p_{CS2_k}=p_{CS_k}\frac{1}{1+k_{ik}}.$$

Тогда при любом скольжении s, которому соответствуют э. д. с.

$$e_1=i_{SA1}\sqrt{r'^2_{RA1}+x'^2_{RA1}}=i_{SA1}z'_{RA1}, \quad (40)$$

$$e_2=i_{SA2}\sqrt{r'^2_{RA2}+x'^2_{RA2}}=i_{SA2}z'_{RA2}, \quad (41)$$

потери

$$p_{CS1}=p_{CS1_k}\left(\frac{e_1}{e_{1k}}\right)^2=p_{CS1_k}k_{e1}=p_{CS_k}\frac{k_{e1}k_{ik}}{1+k_{ik}}, \quad (42)\ (H10)$$

$$p_{CS2}=p_{CS2_k}\left(\frac{e_2}{e_{2k}}\right)^2=p_{CS2_k}k_{e2}=p_{CS_k}\frac{k_{e2}}{1+k_{ik}}, \quad (43)\ (H11)$$

где

$$k_{e1}=\left(\frac{e_1}{e_{1k}}\right)^2, \quad (44)\ (H9)$$

$$k_{e2}=\left(\frac{e_2}{e_{2k}}\right)^2 \quad (45)\ (H9)$$

и полные потери в стали статора

$$p_{CS}=p_{CS1}+p_{CS2}. \quad (46)$$

Потери в стали ротора также создаются полями прямой и обратной последовательности, но скорости вращения этих полей относительно

[3] См. приложение III.

ротора неодинаковы (кроме случая, когда ротор неподвижен) и пропорциональны величинам s и $2-s$. При неподвижном роторе полные потери в стали ротора

$$p_{CR1} = p_{CR1_k} + p_{CR2_k}$$

и, следовательно, так же как и для статора,

$$p_{CR1_k} = p_{CR_k} \frac{k_{ik}}{1+k_{ik}},$$

$$p_{CR2_k} = p_{RC_k} \frac{1}{1+k_{ik}}.$$

Принимая во внимание, что при $s \neq 1$ потери в стали ротора пропорциональны не только квадрату соответствующей э. д. с, но и частоте в степени 1,3, получим для произвольного скольжения s:

$$p_{CR1} = p_{CR1_k} k_{e1} s^{1,3} = p_{CR_k} \frac{k_{e1} k_{ik}}{1+k_{ik}} s^{1,3}, \quad (47)\ (H10)$$

$$p_{CR2} = p_{CR2_k} k_{e2} (2-s)^{1,3} = p_{CR_k} \frac{k_{e2}}{1+k_{ik}} (2-s)^{1,3}. \quad (48)\ (H11)$$

Таким образом, полные потери в стали

$$p_C = p_{CS1} + p_{CS2} + p_{CR1} + p_{CR2}. \quad (49)$$

Учет влияния потерь в стали на величину тока статора[4]. Потери в стали от поля прямой последовательности (в статоре и роторе) вызывают увеличение активных составляющих токов прямой последовательности в фазах A и B на величины

$$i'_{SA1_d} = \frac{p_{CS1} + p_{CR1}}{2e_1}, \quad (50)$$

$$i'_{SB1_d} = \frac{p_{CS1} + p_{CR1}}{2ke_1} = \frac{1}{k} i'_{SA1_d}, \quad (50a)$$

а потери в стали от поля обратной последовательности вызывают увеличение активных составляющих токов обратной последовательности в фазах A и B на величины

$$i'_{SA2_d} = \frac{p_{CS2} + p_{CR2}}{2e_2}, \quad (51)$$

$$i'_{SB2_d} = \frac{p_{CS2} + p_{CR2}}{2ke_2} = \frac{1}{k} i'_{SA2_d}. \quad (51a)$$

Тогда токи принимают следующие значения:

$$i'_{A1} = i'_{SA1} + i'_{SA1_d}, \quad (52)$$

$$i''_{A1} = i''_{SA1},$$

$$i'_{A2} = i'_{SA2} + i'_{SA2_d}, \quad (53)$$

$$i''_{A2} = i''_{SA2},$$

$$i'_A = i'_{A1} + i'_{A2}, \quad (54)$$

$$i''_A = i''_{SA},$$

$$i'_{B1} = i'_{SB1} + i'_{SB1_d}, \quad (55)$$

$$i''_{B1} = i''_{SB1},$$

$$i'_{B2} = i'_{SB2} + i'_{SB2_d}, \quad (56)$$

$$i''_{B3} = i''_{SB2},$$

$$i'_{B2} = i'_{B1} + i'_{B2}, \quad (57)$$

$$i''_B = i''_{SB},$$

$$i' = i'_A + i'_B, \quad (58)$$

$$i'' = i''_S,$$

$$i_A = \sqrt{i'^2_A + i''^2_A}, \quad (59)$$

$$i_B = \sqrt{i'^2_B + i''^2_{SB}}, \quad (60)$$

$$i = \sqrt{i'^2 + i''^2_S}. \quad (61)$$

Механические потери. Потери на трение в подшипниках можно принимать для подшипников скользящего трения

$$p_T \equiv n^{1,5} \equiv (1-s)^{1,5}, \quad (62a)$$

для шариковых подшипников

$$p_T \equiv n \equiv (1-s). \quad (62b)$$

Вентиляционные потери

$$p_B \equiv n^2. \quad (62c)$$

Для асинхронных микродвигателей вентиляционные потери составляют лишь небольшую долю от всех механических потерь и можно принять, что механические потери при любом скольжении равны для двигателей с подшипниками скользящего трения

$$p_{мех} = p_{мех_0} (1-s)^{1,5}, \quad (63)\ (H12)$$

с шариковыми подшипниками

$$p_{мех} = p_{мех_0} (1-s). \quad (64)$$

Джоулевы потери в обмотках и конденсаторе (или добавочном сопротивлении). Потери в обмотках статора составляют:

$$p_{MS} = p_{MSA} + p_{MSB} = i^2_A r_{SA} + i^2_B r_{SB}. \quad (65)\ (H13)$$

Потери в обмотке ротора создаются всеми токами обеих последовательностей и составляют:

$$p_{MR} = i^2_{RA1} r_R + i^2_{RA2} r_R + i^2_{RB1} k^2 r_R + i^2_{RB2} k^2 r_R$$

или, так как

$$i^2_{RB1} k^2 = i^2_{RA1},$$

$$i^2_{RB2} k^2 = i^2_{RA2},$$

то

$$p_{MR} = 2 (i^2_{RA1} r_R + i^2_{RA2} r_R).$$

---

[4] Строго говоря, предлагаемый метод учета потерь в стали теоретически не может быть обоснован. Единственным точным методом было бы введение некоторого активного сопротивления r_m в ответвление эквивалентных схем, т. е. замена jx_m на $r_m + jx_m$. Однако, все уравнения при этом настолько усложняются, что практически их нельзя использовать. С другой стороны, применяя метод, изложенный в этом разделе, мы (как показывают подробные расчеты автора) совершаем лишь незначительную ошибку в определении падения напряжения в обмотке статора, э. д. с. и полезной мощности, достигающую всего 2—3%, что лежит в пределах точности нормальных технических расчетов.

Роторные токи не могут быть измерены и удобнее заменить

$i^2_{RA}r_{1R}$ на $i^2_{SA1}\, r_{RA1}s$ и $i^2_{RA2}\, r_R$ на $i^2_{SA2}r'_{RA2}(2-s)$

(см. выше об электромагнитной мощности). Тогда

$$p_{MR}=p_{MR1}+p_{MR2}=2i^2_{S1}r'_{RA1}s+ +2i^2_{SA2}r'_{RA2}(2-s). \quad (66)\ (H14,15)$$

Потери в конденсаторе (или добавочное сопротивлении) составляют

$$p_k=i^2_B r_C. \quad (67)\ (H\ 13)$$

Другие расчетные величины. Полная механическая мощность ротора представляет собой алгебраическую сумму двух мощностей: электромагнитной мощности прямой последовательности за вычетом потерь в меди ротора от тока прямой последовательности

$$2i^2_{SA1}r'_{RA1}-2i^2_{SA1}r'_{RA1}s=2i^2_{SA1}r'_{RA1}(1-s)$$

и электромагнитной мощности обратной последовательности за вычетом потерь в меди ротора от тока обратной последовательности

$$2i^2_{SA2}r'_{RA2}-2i^2_{SA2}r'_{RA2}(2-s)=-2i^2_{SA2}r'_{RA2}(1-s)$$

(знак минус показывает, что эта мощность создает эффект торможения). Таким образом, полная механическая мощность ротора

$$p'_R=(2i^2_{SA1}r'_{RA1}-2i^2_{SA2}r'_{RA2})(1-s)= =p_{12}(1-s). \quad (68)$$

Полезная механическая мощность ротора

$$p_R=p'_R-p_{мех}-p_{CR}. \quad (69)$$

Подводимая к двигателю мощность

$$p_S=p'_R+p_{MS}+p_{MR}+p_K+p_{CS}. \quad (70)$$

Полный вращающий момент [5]

$$m_э=\frac{97{,}4p_{12}}{n_s}. \quad (71)\ (H16)$$

Полезный вращающий момент

$$m=\frac{97{,}4p_R}{n}=\frac{97{,}4p_R}{(1-s)\,n_s}. \quad (72)\ (H16)$$

Коэффициент полезного действия

$$\eta=\frac{p_R}{p_S}. \quad (73)$$

Коэффициент мощности

$$\cos\varphi=\frac{i'}{i}. \quad (74)$$

Напряжение на конденсаторе составляет:

$$u_k=i_B\sqrt{r^2_C+x^2_C}=i_B\,z_C. \quad (75)$$

Характеристики двигателя с отключенной пусковой фазой. Для расчета характеристик двигателя с отключенной пусковой фазой можно воспользоваться всеми приведенными выше уравнениями, приняв $r_C=\infty$.

[5] Множитель 97,4 позволяет при пересчете относительных единиц в cmkg пользоваться тем же переводным множителем, что и для мощности.

Токи. Подстановка $r_C=\infty$ в уравнения (16) и (17) дает неопределенность вида $\frac{\infty}{\infty}$, так как все члены этих уравнений как в числителе, так и в знаменателе содержат либо r_{B_1}, либо r_{B_2}, включающие в себя r_C. Раскрывая эти неопределенности обычными методами, находим:

$$\dot{i}_{SA1}=\frac{1}{r_{A1}+r_{A2}+j(x_{A1}+x_{A2})}, \quad (76)$$

$$\dot{i}_{SA2}=\frac{1}{r_{A1}+r_{A2}+j(x_{A1}+x_{A2})}, \quad (77)$$

т. е.

$$\dot{i}_{SA1}=\dot{i}_{SA2}.$$

и действительный ток в фазе A

$$\dot{i}_{SA}=2\dot{i}_{SA1}=2\dot{i}_{SA2}.$$

Исключая мнимость у знаменателя находим:

$$\dot{i}_{SA1}=\frac{r_{A1}+r_{A2}}{(r_{A1}+r_{A2})^2+(x_{A1}+x_{A2})^2}- -j\frac{x_{A1}+x_{A2}}{(r_{A1}+r_{A2})^2+(x_{A1}+x_{A2})^2}=i'_{SA1}-ji''_{SA1}, \quad (78)$$

$$\dot{i}_{SA}=2i'_{SA1}-j2i''_{SA1}=i'_{SA}-ji''_{SA}. \quad (79)$$

Таким образом

$$i'_{S1}=\frac{2Q_1}{Q_1^2+S_1^2}, \quad (80)\ (H5)$$

$$i''_{SA}=\frac{2S_1}{Q_1^2+S_1^2}, \quad (81)\ (H5)$$

где

$$Q_1=r_{A1}+r_{A2}, \quad (82)$$

$$S_1=x_{A1}+x_{A2}. \quad (83)$$

Действительный ток

$$i_{SA}=\sqrt{i'^2_{SA}+i''^2_{SA}}. \quad (84)\ (H6)$$

Токи прямой и обратной последовательности в фазе B составляют на основании (3) и (4)

$$\dot{i}_{SB1}=\frac{j}{k}\dot{i}_{SA1},$$

$$\dot{i}_{SB2}=-\frac{j}{k}\dot{i}_{SA2}=-\frac{j}{k}\dot{i}_{SA1}.$$

и действительный ток в фазе B.

$$\dot{i}_{SB}=\dot{i}_{SB1}+\dot{i}_{SB2}=0,$$

как и следовало ожидать, так как фаза B отключена.

Электромагнитная мощность (*момент в синхронных ваттах*). Подставляя в (35) вместо i_{SA1} и i_{SA2} ток $\frac{1}{2}i_{SA}$, получим электромагнитную мощность

$$p_{12}=\frac{1}{2}i^2_{SA}(r'_{RA1}-r'_{RA2})$$

или, обозначая

$$r'_{RA1}-r'_{RA2}=r'_{RA}, \quad (85)$$

находим

$$p_{12}=\frac{1}{2}i^2_{SA}r'_{RA}. \quad (86)\ (H17)$$

Из этого уравнения непосредственно видно, что при неподвижном роторе ($s=1$), когда $r'_{RA1}=r'_{RA2}$, электромагнитная мощность, а следовательно, и момент вращения (пусковой момент) равны нулю.

Потери в стали. В рассматриваемом случае токи прямой и обратной последовательности всегда одинаковы, поэтому

$$e_{1k} = e_{2k}\ k_{ik} = 1.$$

Потери в стали статора от полей прямой и обратной последовательности соответственно равны:

$$p_{CS1} = \frac{1}{2} k_{e1} p_{CS_k}, \quad (87)\ (H10)$$

$$p_{CS2} = \frac{1}{2} k_{e2} p_{CS_k}. \quad (88)\ (H11)$$

Из (47) и (48), полагая $k_{ik} = 1$, находим, что потери в роторе

$$p_{CR1} = \frac{1}{2} k_{e1} p_{CR_k} s^{1,3}, \quad (89)\ (H10)$$

$$p_{CR2} = \frac{1}{2} k_{e2} p_{CR_k} (2-s)^{1,3} \quad (90)\ (H11)$$

Учет влияния потерь в стали на величину тока в статоре может быть произведен по формулам:

$$i'_{SA1d} = \frac{p_{CS1} + p_{CR1}}{e_1}, \quad (50')$$

$$i'_{SA2d} = \frac{p_{CS2} + p_{CR2}}{e_2}. \quad (51')$$

Токи i'_{A1}, i'_{A2}, i'_A и i_A определяются по уравнениям (52), (53), (54) и (59).

Механические потери определяются по уравнению (63) или (64). Джоулевы потери в обмотке статора

$$P_{MS} = i^2_A r_{SA}\ . \quad (91)\ (H13)$$

В обмотке ротора

$$P_{MR} = P_{MR1} + P_{MR2} = \frac{1}{2} i^2_{SA} r'_{RA1} s + $$
$$+ \frac{1}{2} i^2_{SA} r'_{RA2} (2-s). \quad (92)\ (H18,19)$$

Полезная и подводимая мощности, вращающий момент, к. п. д., коэффициент мощности определяются по уравнениям (68) — (74). Коэффициент мощности

$$\cos\varphi = \frac{i'_A}{i_A}. \quad (93)$$

Величины, необходимые для расчета характеристик по опытам холостого хода и короткого замыкания. Для построения характеристик двигателя в функции скольжения необходимо взять из расчета машины или определить опытным путем следующие величины: активные сопротивления R_{SA}, R_{SB}, R_R, R_C; реактивные сопротивления X_{SA}, X_{SB}, X_R, X_C, X_m; потери $P_{мех_0}$, P_{CS_k}, P_{CR_k}; отношение чисел витков обмоток B и A

$$k = \frac{w_B}{w_A}.$$

Оставляя в стороне вопрос о расчетном определении параметров двигателя, рассмотрим их определение опытным путем.

Часть параметров, а именно R_{SA}, R_{SB}, R_C и X_C, могут быть определены непосредственным измерением, остальные рассчитываются по данным, полученным из опытов холостого хода и короткого замыкания.

Отметим еще, что на практике весьма трудно найти раздельно реактивные сопротивления рассеяния статора и ротора. Однако, как будет показано ниже, всегда можно принимать их равными. Даже в том случае (почти никогда не встречающемся в действительности), когда они относятся, как 1:3, мы, принимая их равными, вносим в вычисления ошибку, немногим большую 1%. Исходя из этого, в дальнейшем будем принимать $X_{SA} = X_R$, $X_{SB} = k^2 X_R$.

Необходимо подчеркнуть, что для получения надежных результатов все измерения должны быть проведены весьма тщательно. Все приборы должны быть проверены, напряжение и частота должны поддерживаться постоянными. Рекомендуется вводить поправки на собственное потребление приборов. Отсчет показаний должен производиться быстро во избежание значительного изменения температуры машины за время опыта.

Опытное определение значений X_{SA}, X_R, X_m *и* R_R. К сети присоединяется только рабочая обмотка A статора. Согласно уравнению (76)

$$\dot{I}_{SA} = 2\dot{I}_{SA1} = \frac{2\dot{U}}{R_{A1} + R_{A2} + j(X_{A1} + X_{A2})}.$$

Так как при $s = 1$ $R_{A1} = R_{A2}$, $X_{A1} = X_{A2}$,

то ток короткого замыкания $\dot{I}_{SAk} = \frac{\dot{U}}{R_{A1} + jX_{A1}}. \quad (94)$

Согласно уравнениям (8) и (12) при $s = 1$

$$R_{A1} = R_{SA} + \frac{X^2_m R_R}{R^2_R + (X_m + X_R)^2} = R_{SA} + R, \quad (95)$$

$$X_{A1} = X_{SA} + \frac{X_m R^2_R + X_m X_R (X_m + X_R)}{R^2_R + (X_m + X_R)^2} = X. \quad (96)$$

Полагая $X_{SA} = X_R$[6], можно путем несложных преобразований найти, что

$$R = \frac{R_R \frac{X_0 - X_i}{X_0}}{1 + \left(\frac{R_R}{X_0}\right)^2}, \quad (97)$$

$$X = \frac{X_i\left(1 + \frac{R^2_R}{X_i X_0}\right)}{1 + \left(\frac{R_R}{X_0}\right)^2}, \quad (98)$$

где

$$X_0 = X_{SA} + X_m, \quad (99)$$

$$X_i = X_{SA} + \frac{X_R X_m}{X_R + X_m}. \quad (100)$$

Значения R и X могут быть легко найдены по данным опыта к. з.

$$R = \frac{P_k}{I^2_{SA_k}} - R_{SA}, \quad (101)$$

$$X = \sqrt{\left(\frac{U}{I_{SA_k}}\right)^2 - \left(\frac{P_k}{I^2_{SA_k}}\right)^2}. \quad (102)$$

Сопротивление статорной обмотки R_{SA} должно быть измерено непосредственно после окончания опыта к. з. Опыт рекомендуется провести при двух напряжениях: номинальном и дающем номинальное значение тока I_{SA}. Это позволяет проконтролировать влияние насыщения на величину реактивных сопротивлений и более точно рассчитать характеристики, если для скольжений от 0 до соответствующего максимальному моменту (примерно 0,1—0,3) воспользоваться реактивными сопротивлениями, найденными при номинальном токе, а для $s = 1$ — найденными при номинальном напряжении.

---

[6] Учитывая, что X_m практически всегда не менее чем в 20 раз превышает X_{SA} или X_R, легко показать, что, принимая $X_{SA} = X_R$, мы совершаем ничтожную ошибку. Если, например, $X_m = 12\Omega$, $X_{SA} = 0,6\Omega$ и $X_R = 0,2\Omega$, то $X_0 = 12,6$ и $X_i = 0,797\Omega$. Принимая же $X_{SA} = X_R = 0,4$, получим $X_0 = 12,4$ и $X_i = 0,788\Omega$, т. е. совершаем ошибку в определении X_0 на 1,6%, а в определении X_i на 1,1 %.

Согласно уравнениям (8), (9), (12), (13) при $s=0$

$$R_{A1}=R_{SA},$$

$$R_{A2}=R_{SA}+\frac{X_m^2\frac{R_R}{2}}{\left(\frac{R_R}{2}\right)^2+(X_m+X_R)^2}\approx R_{SA}+\frac{R_R}{2},$$

$$R_{A1}+R_{A2}=2R_{SA}+\frac{R_R}{2}, \tag{103}$$

$$X_{A1}=X_{SA}+X_m=X_0,$$

$$X_{A2}=X_{SA}+\frac{X_m\left(\frac{R_R}{2}\right)^2+X_m X_R(X_m+X_R)}{\left(\frac{R_R}{2}\right)^2+\left(X_m+X_R\right)^2}\approx$$

$$\approx X_{SA}+\frac{X_m X_R}{X_m+X_R}=X_i,$$

$$X_{A1}+X_{A2}=X_0+X_i \tag{104}$$

Тогда, согласно уравнению (76) при $s=0$

$$\dot I_{SA_0}=\frac{2\dot U}{2R_{SA}+\frac{1}{2}R_R+j(X_0+X_i)},$$

$$I_{SA0}=\frac{2U}{\sqrt{(2R_{SA}+\frac{1}{2}R_R)^2+(X_0+X_i)^2}}.$$

Так как

$$X_0+X_i\gg 2R_{SA}+\frac{1}{2}R_R,$$

то влияние активного сопротивления при расчете на линейке учтено быть не может. Поэтому будем полагать

$$I_{SA0}=\frac{2U}{X_0+X_i}. \tag{105}$$

Ток I_{SA0} легко определяется из опыта холостого хода при номинальном напряжении на зажимах.

Решая совместно уравнения (97), (98) и (105), находим:

$$X_i=\frac{U}{I_{SA0}}-\sqrt{\left(\frac{U}{I_{SA0}}-X\right)^2+R^2}, \tag{106}$$

$$X_0=\frac{2U}{I_{SA0}}-X_i, \tag{107}$$

$$R_R=\frac{RX_0}{X_0-X_i}. \tag{108}$$

Интересно отметить, что аналогичные уравнения для X_i, X_0 и R_R были получены Veinott на основании теории поперечного поля.

Значения $X_{SA}=X_R$ и X_m можно теперь найти по уравнениям (99) и (100)

$$X_m=\sqrt{X_0(X_0-X_i)}, \tag{109}$$

$$X_{SA}=X_R=X_0-X_m. \tag{110}$$

Определение значений потерь. Для определения потерь в стали в случае конденсаторного двигателя в опыте к. з. к сети присоединяются обе обмотки[7]. В случае же двигателей с конденсаторным или реостатным пуском (с отключением пусковой обмотки центробежным выключателем) необходимо опыт к. з. повторить дважды: при включении на сеть двух обмоток статора и при включении только одной рабочей обмотки. Данные, полученные при включении двух обмоток, используются в диапазоне скольжений от $s=1$ до $s=s'$ соответствующего скорости, при которой происходит отключение пусковой обмотки, а данные, полученные при включении только рабочей обмотки,— в диапазоне скольжений от $s=s'$ до $s=0$.

Опыт холостого хода для определения механических потерь производится при включении только рабочей обмотки[8]. Само собой разумеется, что опыт к. з. при включении одной обмотки и опыт холостого хода одновременно служат и для определения параметров предыдущего параграфа.

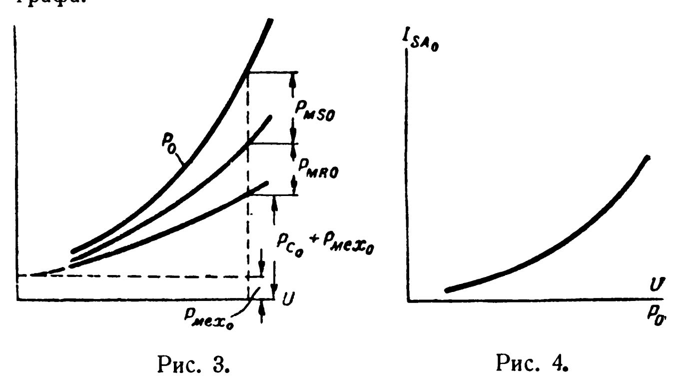


Рис. 3. Рис. 4.

Для нахождения $p_{мех_0}$ значения P_0 и I_{SA0} определяются для нескольких значений напряжения и наносятся в виде кривых

$$P_0=f(U),\quad I_{SA0}=\varphi(U),$$

как показано на рис. 3 и 4. Далее, для каждого значения I_{SA0} определяются потери в меди статора по уравнению (91)

$$P_{MS0}=I_{SA0}^2 R_{SA}, \tag{111}$$

и потери в меди ротора по уравнению (70)

$$P_{MR0}=I_{S:0}^2 R'_{SA_{20}}=I_{SA0}^2\frac{X_m^2\frac{R_R}{2}}{\left(\frac{R_R}{2}\right)^2+(X_m+X_R)^2}\approx$$

$$\approx I_{SA0}^2\frac{X_m^2\frac{R_R}{2}}{(X_m+X_R)^2}. \tag{112}$$

Вычитая из ординат кривой $P_0=f(U)$ (рис. 3) значения P_{MS0} и P_{MR0} получим кривую, представляющую зависимость суммы потерь в стали (при холостом ходе) и механических. Продолжив эту кривую до оси ординат, находим $P_{мех_0}$.

Определение суммарных потерь в стали статора и ротора при неподвижном роторе производится по опыту к. з:

$$P_{CSk}+P_{CRk}=P_k-P_{MSk}-P_{MRk}-P_{K_k}. \tag{113}$$

При опыте с двумя включенными обмотками потери в меди статора, уравнения (65),

$$P_{MS_k}=I_{SA_k}^2 R_{SA}+I_{SB_k}^2 R_{SB}; \tag{114}$$

потери в меди ротора, уравнение (66),

$$P_{MR_k}=2I_{SA1_k}^2 R'_{AA1_k}+2I_{SA2_k}^2 R'_{RA2_k}.$$

---

[7] Если при пуске в ход и при рабочем режиме в цепь фазы B включаются конденсаторы различной емкости, то необходимо произвести два опыта к. з. при обеих емкостях.

[8] Возможно, конечно, определить $P_{мех_0}$ и при включении двух обмоток, но при этом потребуется еще один опыт, что практически нецелесообразно.

В приложении IV показано, что

$$I^2_{SA1}+I^2_{SA2}=\frac{1}{2}\left(I^2_{SA}+k^2I^2_{SB}\right).$$

Так как при $s=1$

$$R'_{RA1_k}=R'_{RA2_k},$$

то

$$P_{MR_k}=\left(I^2_{SA_k}+k^2I^2_{SB_k}\right)R'_{RA1_k}=$$

$$=\left(I^2_{SA_k}+k^2I^2_{SB_k}\right)\frac{X^2_mR_R}{R^2_R+(X_m+X_R)^2}. \qquad (115)$$

Потери в конденсаторе (или добавочном сопротивлении)

$$P_{K_k}=I^2_{SB_k}R_C. \qquad (116)$$

При опыте с одной включенной обмоткой

$$P_{MR_k}=I^2_{SA_k}R_{SA}, \qquad (114')$$

$$P_{MR_k}=I^2_{SA_k}R'_{RA1_k}=I^2_{SA_k}\frac{X^2_mR_R}{R^2_R+(X_m+X_R)^2}, \qquad (115)$$

$$P_{K_k}=0.$$

Точное разделение потерь в стали на P_{CS_k} и P_{CR_k} может быть произведено лишь при поверочном расчете машины. Приближенно можно полагать, что потери в стали распределяются пропорционально объемам статорного и роторного пакетов[9].

Так как обычно длины статора и ротора одинаковы, то

$$\frac{P_{CS_k}}{P_{CR_k}}\approx\frac{D^2_a-D^2}{D^2}=\left(\frac{D_a}{D}\right)^2-1. \qquad (117)$$

Для микродвигателей отношение $\frac{D_a}{D}$ составляет обычно 1,65—2,0. Таким образом, в среднем $\frac{P_{CS_k}}{P_{CR_k}}\approx 2{,}4$, т. е. около 5/7 от суммы $P_{CS_k}+P_{CR_k}$ приходится на статор, а около 2/7 на ротор.

Измерение R_{SA}, R_{SB}, R_C и X_C. Как уже было указано выше, значение R_{SA_k}, используемое для определения параметров по опытам к. з. [уравнения (101), (114), (114')], должно измеряться непосредственно после опыта. Значение R_{SA_0}, входящее в уравнение (111), определяется непосредственно после опыта холостого хода. Сопротивление R_{R_k}, найденное по уравнению (108), будет, очевидно, также относиться к температуре опыта к. з. Его величину нужно подставлять в уравнение (115) или (115'). Сопротивление же R_{R_0}, входящее в уравнение (112), должно соответствовать температуре опыта холостого хода и может быть найдено путем пересчета R_{R_k} при к. з. в отношении значений R_{SA_0} при холостом ходе и R_{SA_k} при к. з.

$$R_{R_0}=R_{R_k}\frac{R_{SA_0}}{R_{SA_k}}. \qquad (118)$$

Для расчета характеристик все сопротивления должны быть пересчитаны на стандартную температуру 75°С (ГОСТ 183-41). Тогда сопротивление статорной обмотки A

$$R_{SA_{75}}=R_{SA_\vartheta}\frac{310}{\vartheta+235}, \qquad (119)$$

где R_{SA_ϑ} — сопротивление, измеренное у холодной машины (лучше всего точным мостиком) при температуре окружающей среды ϑ°С.

Сопротивление

$$R_{R_{75}}=R_{R_k}\frac{R_{SA_{75}}}{R_{SA_k}}. \qquad (120)$$

Сопротивление статорной обмотки B $R_{SB\vartheta}$ измеряется в холодном состоянии, а значения R_{SB_k} при к. з. [входящее в уравнение (114)] и $R_{SB_{75}}$ при стандартной температуре определяется пересчетом по формулам

$$R_{SB_k}=R_{SB_\vartheta}\frac{R_{SA_k}}{R_{SA_\vartheta}}, \qquad (121)$$

$$R_{SB_{75}}=R_{SB_\vartheta}\frac{R_{SA_{75}}}{R_{SA_\vartheta}} \qquad (122)$$

Сопротивления конденсатора R_C и X_C измеряются обычным методом при помощи вольтметра, амперметра и ваттметра при пропускании через конденсатор номинального тока фазы B номинальной частоты:

$$R_C=\frac{P_K}{I^2_{SB_н}}, \qquad (123)$$

$$X_C=\sqrt{\left(\frac{U}{I_{SB_н}}\right)^2-R^2_C}. \qquad (124)$$

У двигателя с реостатным пуском сопротивления добавочного сопротивления R_{C_ϑ} измеряется в холодном состоянии и пересчитывается на стандартную температуру по формуле:

$$R_{C_{75}}=R_{C_\vartheta}\frac{R_{SA_{75}}}{R_{SA_\vartheta}}. \qquad (125)$$

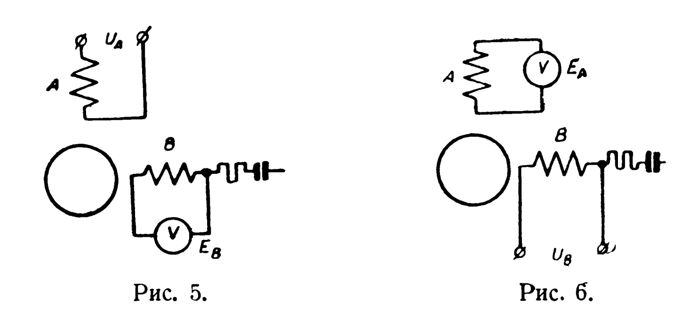


Рис. 5. Рис. 6.

Определение отношения $k=\frac{w_B}{w_A}$. При вращении двигателя вхолостую, с отключенной пусковой фазой, от сети с напряжением $U_A=U_н$ измеряют э. д. с. E_B на пусковой обмотке, как показано на рис. 5. После этого заставляют двигатель вращаться вхолостую с отключенной рабочей обмоткой, подведя к пусковой обмотке напряжение $U_B\approx 1{,}2\,E_B$, и измеряют э. д. с. E_A на рабочей обмотке, как показано на рис. 6.

Тогда отношение k вычисляется по уравнению

$$k=\sqrt{\frac{U_BE_B}{U_AE_A}}. \qquad (126)$$

Приложение I. Принятые обозначения

Большими буквами обозначены значения величин в действительных единицах (в вольтах, амперах, омах, ваттах и т. д.), малыми буквами—значения тех же величин в относительных единицах.

[9] Это было бы точно, если индукции во всех частях машины имели бы одинаковую величину.

Индексы обозначают:

$н$ — номинальный.
k — относящийся к к. з., т. е. к скольжению 1,0.
0 — относящийся к холостому ходу, т. е. к скольжению 0.
1,2 — прямая, обратная последовательность.
A, B — относящийся к фазе A (рабочей), к фазе B (пусковой).
75 — сопротивление приведено к стандартной температуре.
′,″ — у токов и напряжений обозначают активные и реактивные составляющие.

$Z_{A1} = R_{A1} + jX_{A1}$ — сопротивление эквивалентной схемы прямой последовательности фазы A.
$Z_{A2} = R_{A2} + jX_{A2}$ — то же обратной последовательности фазы A.
$Z_{B1} = R_{B1} + jX_{B1}$ — то же прямой последовательности фазы B.
$Z_{B2} = R_{B2} + jX_{B2}$ — то же обратной последовательности фазы B.
$Z_{SA} = R_{SA} + jX_{SA}$ — сопротивление статорной обмотки фазы A.
$Z_{SB} = R_{SB} + jX_{SB}$ — то же фазы B.
$Z_C = R_C - jX_C$ — сопротивление конденсатора.
$Z_R = R_R + jX_R$ — сопротивление роторной обмотки, приведенное к числу витков фазы A.
$Z'_{RA1} = R'_{RA1} + jX'_{RA1}$ — эквивалентное сопротивление разветвления ротор — намагничивающая ветвь в схеме замещения прямой последовательности фазы A.
$Z'_{RA2} = R'_{RA2} + jX'_{RA2}$ — то же обратной последовательности фазы A.
$Z'_{RB1} = R'_{RB1} + jX'_{RB1}$ — то же прямой последовательности фазы B.
$Z'_{RB2} = R'_{RB2} + jX'_{RB2}$ — то же обратной последовательности фазы B.
jX_m — сопротивление намагничивающей ветви.
jX_0 — реактивное сопротивление статорной обмотки при разомкнутой роторной обмотке ($s = 0$).
jX_i — реактивное сопротивление идеального к. з.
R, X — расчетные активное и реактивное сопротивления при опыте к. з.
U — напряжение на зажимах.
U_K — напряжение на конденсаторе.
E — электродвижущая сила.
I_{SA1} — ток прямой последовательности в статоре фазы A без учета потерь в стали.
I_{SA2} — то же обратной последовательности в фазе A.
I_{SB1} — то же прямой последовательности в фазе B.
I_{SB2} — то же обратной последовательности в фазе B.
I_{SA} — действительный ток в фазе A без учета потерь в стали.
I_{SB} — то же в фазе B.
I_S — то же в линии.
I'_{SA1d} — добавочный активный ток прямой последовательности в фазе A, учитывающий потери в стали.
I'_{SA2d} — то же обратной последовательности.
I_{A1} — ток прямой последовательности в статоре фазы A с учетом потерь в стали.
I_{A2} — то же обратной последовательности в фазе A.
I_{B1} — то же прямой последовательности в фазе B.
I_{B2} — то же обратной последовательности в фазе B.
I_A — действительный ток в фазе A с учетом потерь в стали.
I_B — то же в фазе B.
I — то же в линии.
I_{RA1} — ток прямой последовательности в обмотке ротора, приведенный к числу витков обмотки статора фазы A.
I_{RA2} — то же обратной последовательности.
I_{RB1} — то же прямой последовательности, приведенный к числу витков обмотки статора фазы B.
I_{RB2} — то же обратной последовательности.
P_{12} — электромагнитная мощность (момент в синхронных ваттах).
P'_R — полная механическая мощность ротора.
P_R — полезная механическая мощность ротора.
P_S — мощность, подводимая из сети.
P_{CS} — полные потери в стали статора.
P_{CS1} — потери в стали статора, вызываемые полем прямой последовательности.
P_{CS2} — то же, вызываемые полем обратной последовательности.
P_{CR} — полные потери в стали ротора.
P_{CR1} — потери в стали ротора, вызываемые полем прямой последовательности.
P_{CR2} — то же, вызываемые полем обратной последовательности.
P_T — потери на трение в подшипниках.
P_B — потери вентиляционные.
$P_{мех}$ — полные механические потери.
P_{MS} — джоулевы потери в обмотках статора.
P_{MR} — то же в обмотке ротора.
P_K — то же в конденсаторе (или добавочном сопротивлении).
k — отношение чисел эффективных витков обмоток B и A.
k_{ik} — отношение потерь в стали от прямого поля к потерям от обратного поля при неподвижном роторе.
k_e — квадрат отношения э. д. с.
s — скольжение.
n — скорость вращения об/мин.
n_s — синхронная скорость вращения об/мин.
η — коэффициент полезного действия.
$\cos\varphi$ — коэффициент мощности.
D_a — наружный диаметр статорного пакета.
D — внутренний диаметр статорного пакета.

Приложение II. **Вывод уравнения для токов**

Если $k=\frac{w_B}{w_A}$, то на основании теории симметричных составляющих для двухфазной системы

$$j\dot I_{SA1} = k\dot I_{SB1},$$

$$-j\dot I_{SA2} = k\dot I_{SB2}$$

или

$$\dot I_{SB1} = \frac{j}{k}\dot I_{SA1},$$

$$\dot I_{SB2} = -\frac{j}{k}\dot I_{SA2}.$$

Напряжение, приложенное к фазе A, равно напряжению сети $\dot U$. Поэтому

$$\dot U_A = \dot U = \dot U_{A1} + \dot U_{A2} = \dot I_{SA1} Z_{A1} + \dot I_{SA2} Z_{A2}.$$

Но это же напряжение $\dot U$ приложено и к фазе B, т. е.

$$\dot U_B = \dot U = \dot U_{B1} + \dot U_{B2} = \dot I_{SB1} Z_{B1} + \dot I_{SB2} Z_{B2} = \frac{j}{k}\dot I_{SA1} Z_{B1} - \frac{j}{k}\dot I_{SA2} Z_{B2}.$$

Решая совместно два последних уравнения, находим токи

$$\dot I_{SA1} = \frac{\dot U (Z_{B2} - jkZ_{A2})}{Z_{A1} Z_{B2} + Z_{A2} Z_{B1}},$$

$$\dot I_{SA2} = \frac{\dot U (Z_{B1} + jkZ_{A1})}{Z_{A1} Z_{B2} + Z_{A2} Z_{B1}}.$$



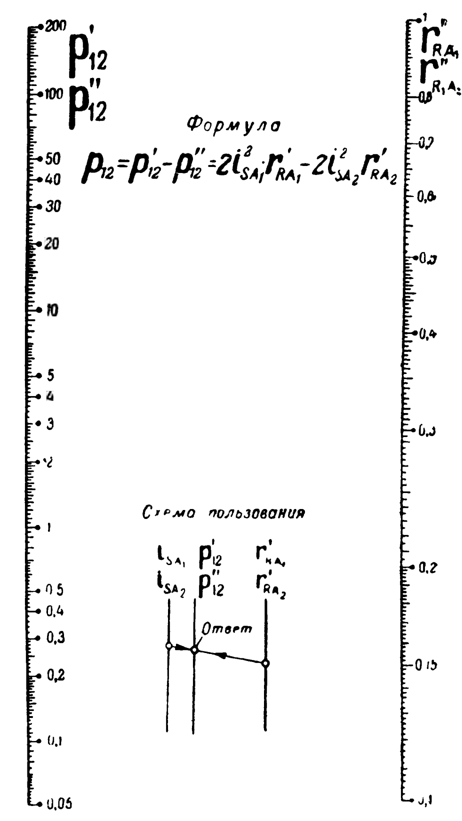


Рис. 7.

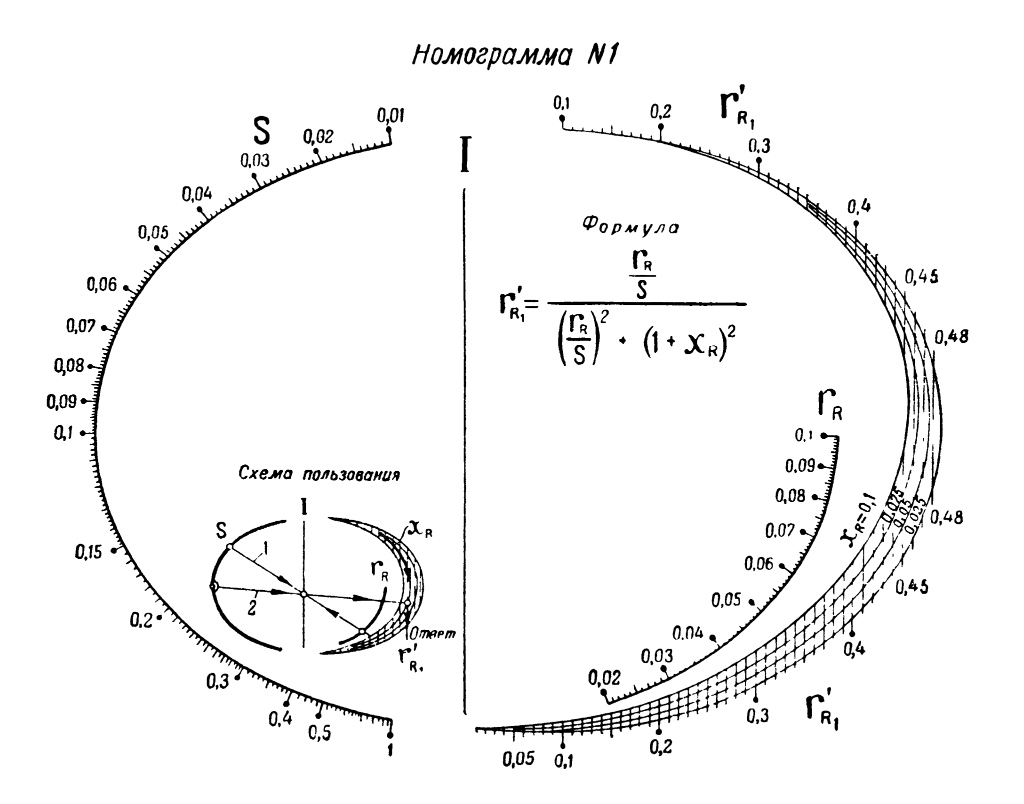


Рис. 8.

Приложение III. К определению потерь в стали при эллиптическом поле

Законность раздельного определения потерь в стали от прямого и от обратного полей может быть обоснована на основании следующих соображений.

Так как эллиптическое (в частном случае пульсирующее) поле может рассматриваться как результат наложения двух круговых полей, имеющих амплитуды B_1 и B_2 и вращающихся в разные стороны с одинаковой угловой скоростью ω, то амплитуда результирующего поля (радиус-вектор эллипса) в момент времени t

$$B=\sqrt{(B_1+B_2)^2\cos^2\omega t+(B_1-B_2)^2\sin^2\omega t}=\sqrt{B_1^2+B_2^2+2B_1B_2\cos 2\omega t},$$

где $2\omega t$ — угол расхождения векторов B_1 и B_2 для этого момента. Тот же результат получается, если рассматривать эллиптическое поле как наложение двух гармонических колебаний $(B_1+B_2)\cos\omega t$ и $(B_1-B_2)\sin\omega t$, имеющих амплитуды B_1+B_2 и B_1-B_2 (большая и малая полуоси эллипса) и сдвинутых во времени на угол $\frac{\pi}{2}$. Действительно, из приведенного уравнения следует, что при $2\omega t=0$, т. е. $\omega t=0$, $B=B_1+B_2$, а при $2\omega t=\pi$, т. е. $\omega t=\frac{\pi}{2}$, $B=B_1-B_2$.

Потери в стали в элементарном объеме, имеющем длину пакета и ограниченном бесконечно малым углом $d(\omega t)$

$$dP_C=A\cdot B^2\,d(\omega t),$$

где A — постоянная величина (при $\omega=\mathrm{const}$). Полные потери во всем объеме пакета статора, очевидно, равны:

$$P_C=A\cdot\int_0^{2\pi}B^2d(\omega t)=A\int_0^{2\pi}B_1^2d(\omega t)+A\int_0^{2\pi}B_2^2d(\omega t)+A\int_0^{2\pi}B_1B_2\cos 2\omega t\,d(\omega t)=2\pi AB_1^2+2\pi AB_2^2=P_{C1}+P_{C2},$$

так как последний интеграл обращается в нуль.

Тем самым мы доказали, что потери в стали от эллиптического поля могут рассчитываться как сумма потерь от прямого и от обратного полей. Так как $B\equiv e$, то

$$\frac{B_1}{B_2}=\frac{e_1}{e_2}\quad\text{или}\quad\frac{P_{C1}}{P_{C2}}=\frac{e_1^2}{e_2^2}.$$

Приложение IV. Вывод уравнения для $I_{A1}^2+I_{A2}^2$

Из уравнений

$$\dot I_A=\dot I_{A1}+\dot I_{A2},$$

$$\dot I_B=\dot I_{B1}+\dot I_{B2}=\frac{j}{k}\dot I_{A1}-\frac{j}{k}\dot I_{A2},$$

находим:

$$\dot I_{A1}=\frac{\dot I_A}{2}-jk\frac{\dot I_B}{2},$$

$$\dot I_{A2}=\frac{\dot I_A}{2}+jk\frac{\dot I_B}{2}$$

или

$$\dot I_{A1}=\frac{I'_A}{2}+j\frac{I''_A}{2}-jk\left(\frac{I'_B}{2}+j\frac{I''_B}{2}\right)=\frac{I'_A}{2}+\frac{kI''_B}{2}+j\left(\frac{I''_A}{2}-\frac{kI'_B}{2}\right).$$

$$\dot I_{A2}=\frac{I'_A}{2}+j\frac{I''_A}{2}+jk\left(\frac{I'_B}{2}+j\frac{I''_B}{2}\right)=\frac{I'_A}{2}-\frac{kI''_B}{2}+j\left(\frac{I''_A}{2}+\frac{kI'_B}{2}\right).$$

Тогда

$$I_{A1}^2+I_{A2}^2=\left(\frac{I'_A}{2}+\frac{kI''_B}{2}\right)^2+\left(\frac{I''_A}{2}-\frac{kI'_B}{2}\right)^2+\left(\frac{I'_A}{2}-\frac{kI''_B}{2}\right)^2+\left(\frac{I''_A}{2}+\frac{kI'_B}{2}\right)^2=\frac{1}{2}\left(I'^2_A+I''^2_A\right)+\frac{1}{2}\left(I'^2_B+I''^2_B\right)=\frac{1}{2}\left(I_A^2+I_B^2\right).$$

* * *

Ввиду недостатка места в журнале помещены в уменьшенном виде лишь две номограммы в качестве иллюстрации метода. Полный комплект номограмм можно получить в отделе научно-исследовательских работ Московского энергетического института (Москва, Красноказарменная ул., 14), куда и надлежит обращаться со всеми запросами по этому поводу.



О нормативах безопасности влияния электрической защиты подземных сооружений от коррозии

Кандидат техн. наук В. С. КАЛЬМАН

Энергетический институт им. Есьмана Академии наук Азербайджанской ССР

В связи с развитием подземного городского хозяйства вопрос борьбы с коррозией приобретает большое значение. Согласно существующим «Правилам защиты подземных металлических сооружений от коррозии блуждающими токами» безопасность влияния электрического дренажа на соседние сооружения обеспечивается ограничением потенциала дренируемого сооружения. Однако, как вытекает из анализа наблюдений, устанавливаемый Правилами критерий безопасности влияний является недостаточным. Кроме того, его применение в некоторых случаях приводит к снижению эффективности защиты. Предлагаются новые нормативы безопасности и методика контроля влияний.

Электрические методы защиты подземных металлических сооружений от почвенной коррозии и от электролиза блуждающими токами получают у нас все большее и большее распространение. Между тем, существующие «Правила защиты подземных металлических сооружений от коррозии блуждающими токами» базируются на недостаточном опыте, существовавшем к моменту издания Правил в 1940 г., как это и отмечалось в пояснительной записке в проекту Правил.

В частности, устанавливаемая Правилами важнейшая величина — критерий безопасности соседних подземных сооружений, не оправдывается ни теоретически, ни практически.

Опасность в работе электрических дренажей заключается, как известно, в том, что создаваемые дренажем отрицательные потенциалы на защищаемом сооружении могут вызвать утечку тока (анодные зоны) на соседних сооружениях. Устранение этой опасности осуществляется согласно Правилам (§ 99) следующим образом:

«Чтобы подземное сооружение, защищенное от коррозии с помощью электрических методов, не причиняло вреда соседним незащищенным сооружениям, среднее значение отрицательного потенциала, сообщаемого этому сооружению в местах, где оно минимально (по абсолютной величине), и в пунктах дренирования, должно поддерживаться в пределах от минус 0,2 V до минус 0,5 V».

В основу правила принято предположение, что между величиной потенциала защищаемого сооружения, с одной стороны, и потенциалом и плотностью тока утечки соседнего сооружения, с другой, — существует прямая пропорциональность. Предполагается, что, ограничивая отрицательный потенциал защищаемого сооружения какой-то определенной величиной, мы тем самым ограничим некоторой, также вполне определенной, величиной положительный потенциал на соседнем сооружении. Однако, учитывая все разнообразие факторов, входящих в рассматриваемую зависимость (взаимное расположение и расстояние между сооружениями, их размеры, наличие покрытия, проводимость почвы, наличие других сооружений и т. п.), мало вероятно, что эта зависимость будет иметь столь простой вид [Л. 1].

Ниже приводятся некоторые результаты исследований влияния дренажной защиты на соседние сооружения, показывающие, какого вида зависимости действительно существуют между рассматриваемыми величинами.

Случай I. На рис. 1 показано взаимное расположение дренированных кабелей АТС и водопроводов. Кабели АТС (голые, освинцованные) уложены в бетонной канализации. При исследовании потенциал кабеля в дренажной точке изменялся от 0,03 V при отключенном дренаже до —1,12 V при включенном. Потенциалы на пересекающих кабель водопроводах приведе-

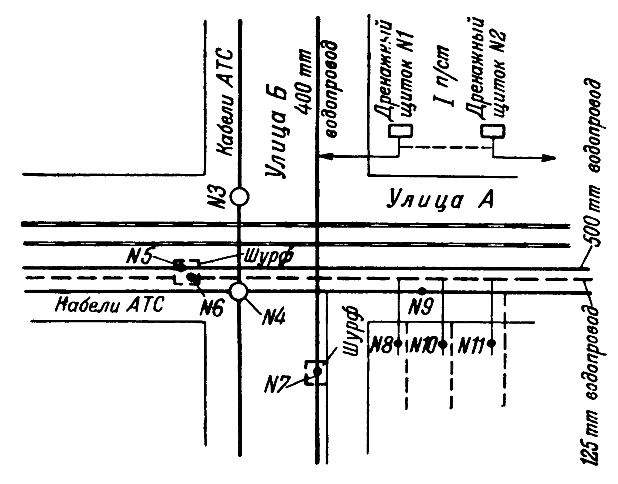


Рис. 1. План подземных сооружений и расположения пунктов измерений.

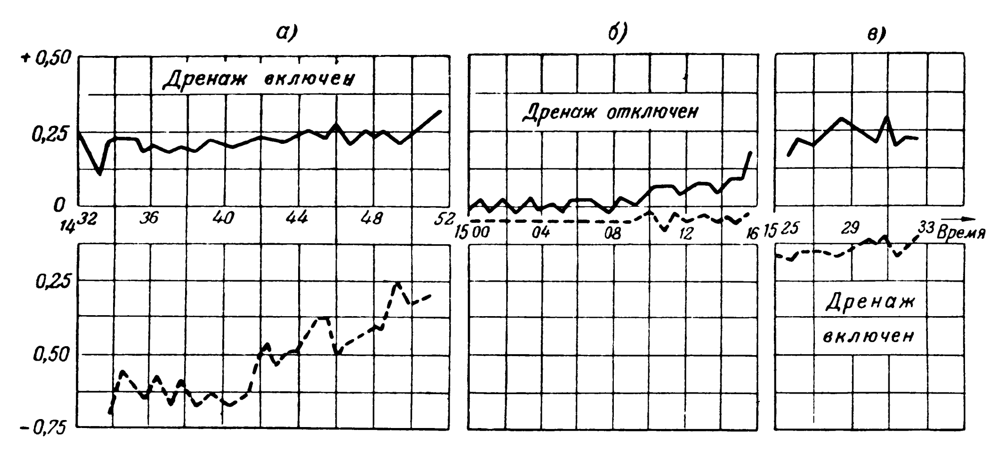


Рис. 2. Влияние дренажа кабелей АТС на потенциалы (в V) трубопровода; по оси абсцисс отложено время (часы и минуты)

——— потенциал ответвления водопровода относительно земли;
— — — потенциал кабелей АТС относительно земли.

дренированном газопроводе, потенциал на пересекающем его водопроводе остается практически без изменения.

Случай II. На рис. 2 приведена синхронная запись регистрирующим вольтметром потенциалов дренированного кабеля и пересекающего его водопровода малого диаметра. Несмотря на значительное изменение отрицательного потенциала на дренированном кабеле (от —0,71 до —0,25 V), потенциал водопровода почти не изменился (*а*). Резкое снижение потенциала водопровода произошло только при отключении дренажа (*б*). При вторичном включении дренажа потенциал кабеля оказался значительно меньше, чем при первом включении, однако это мало повлияло на потенциал водопровода (*в*). Сопротивления дренажных реостатов оставались неизменными, и средний дренажный ток за каждый из периодов изменялся незначительно. Таким образом, эти измерения показывают, что в рассматриваемом случае фактором, определяющим состояние незащищенного сооружения является не величина потенциала на дренируемом сооружении, а само по себе действие дренажа.

Случай III. На рис. 3 приведена синхронная запись потенциала кабеля регистрирующим вольтметром и плотности тока утечки водопровода регистрирующим амперметром. Ток утечки из водопровода улавливался токособирателем Габера. В исследуемой точке ток подтекал из почвы к водопроводу и, как видно из диаграммы, включение дренажа на кабеле и образование на нем больших отрицательных потенциалов, порядка —0,9 V, увеличивало плотность тока подтекания на водопроводе и, таким образом, уменьшало возможность его коррозии. Аналогичные результаты были получены при иссле-

ны в табл. 1. Как видно, влияние дренажа кабелей на водопроводы большого диаметра очень невелико, несмотря на значительную величину отрицательного потенциала на кабеле (вдвое большей, чем допускают Правила). В гораздо большей степени проявилось влияние дренажа кабеля на мелкие трубопроводы — ответвления от магистральных.

Весьма значительные потенциалы на дренируемом сооружении очень мало изменяют состояние одних соседних сооружений и значительно изменяют состояние других. Еще более характерные результаты получились при исследовании влияния на одном пересечении трубопроводов (табл. 2). Несмотря на четырехкратное против указываемого Правилами значение отрицательного потенциала, возникшее на

Таблица 1

Влияние дренажей кабелей АТС на потенциалы водопроводов

№ точек измерения (рис. 1)	Водопровод	Потенциалы относительно земли, V	
		при включенном дренаже	при отключенном дренаже
5	500-mm водопровод .	+0,29	+0,24
7	400-mm водопровод .	+0,17	+0,16
6	125-mm водопровод	+0,40	+0,41
9	Ответвление водопровода	+0,19	+0,03
10	То же	+0,10	+0,05

Таблица 2

Влияние дренажа газопровода на потенциалы водопровода

Сооружение	Потенциалы, V	
	при включенном дренаже	при отключенном дренаже
Дренированный газопровод . .	—2,05	+0,43
Недренированный 124-mm водопровод	+0,21	+0,20

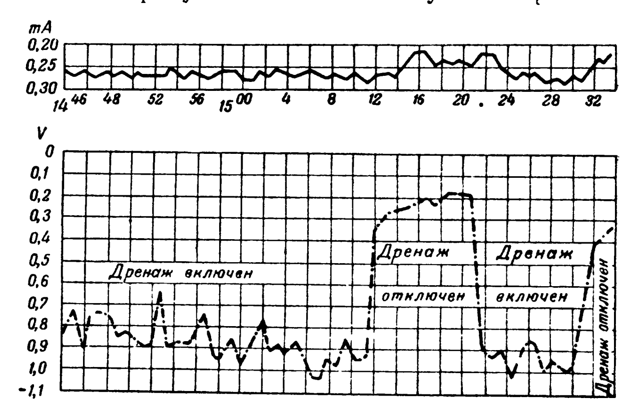


Рис. 3. Влияние дренажа кабелей АТС на плотность тока утечки водопровода.

——— потенциал кабеля относительно земли;
— . — . . —плотность токов утечки из 600-mm водопровода.

довании совместного влияния дренажей газопровода и кабеля на водопровод в узле подземных сооружений, показанном на рис. 4 (табл. 3).

Табл. 3 показывает, что в условиях сложной сети подземных сооружений влияние дренажей на соседние сооружения может оказаться противоположным тому, которое получается в элементарном, простейшем случае. Включение дренажей привело к снижению потенциалов не только на дренируемых сооружениях — кабеле АТС и газопроводе, но и на соседнем недренированном 600-mm водопроводе.

Таблица 3

Совместное влияние дренажей газопровода и кабелей на потенциалы водопровода

Сооружение	Потенциалы, V	
	при включенном дренаже	при отключенном дренаже
Дренированный газопровод . .	+0,69	+1,61
Дренированный кабель АТС . .	−0,41	−0,06
Недренированный 600-mm водопровод	+0,23	+1,04

Таблица 4

Сооружение	Потенциалы, V	
	при включенном дренаже	при отключенном дренаже
Дренированный 350-mm газопровод		
точка № 1	−0,32	+0,24
точка № 2	−0,08	+0,19
Недренированный 100-mm газопровод	+0,25	−0,18

Случай IV. Приведенные в табл. 4 результаты измерений показывают, что при наличии на дренируемом сооружении отрицательного потенциала, не превосходящего предписываемого правилами максимума — 0,5 V, влияние дренажа на соседнее сооружение принимает явно опасную величину. С отрицательного (защитного) потенциал на 100-mm газопроводе, расположенном по соседству с дренируемым 350-mm газопроводом, сделался положительным и опасным по абсолютной величине.

Приведенные исследования влияния дренажа на соседние сооружения достаточно убедительно свидетельствуют о ненадежности и недостаточности устанавливаемого Правилами критерия безопасности действия защиты.

Предписываемое Правилами ограничение максимального отрицательного потенциала в некоторых случаях оказывается излишним, а в других случаях недостаточным. Кроме того, из всего изложенного вытекает, что строгое соблюдение рассматриваемого правила приводит к уменьшению эффективности дренажной защиты, поскольку заставляет в некоторых случаях уменьшать дренажные токи и сокращать, таким образом, протяжение защищаемых зон

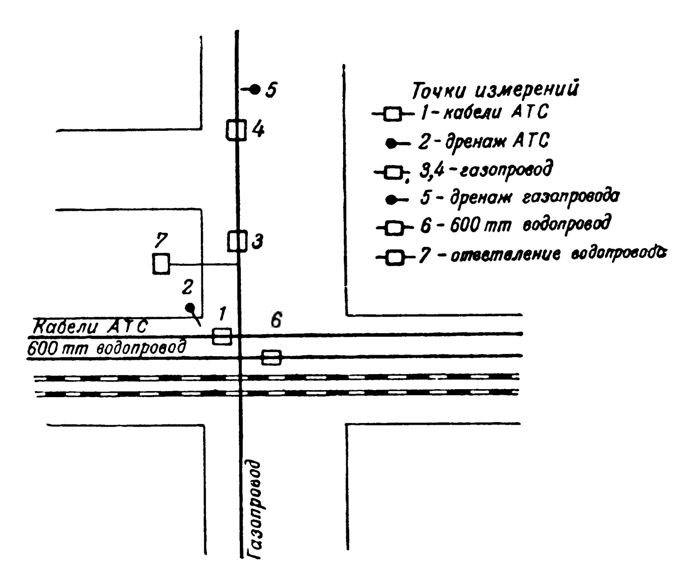


Рис. 4. План подземных сооружений и расположения пунктов измерений.

подземных сооружений. Наряду с этим его соблюдение не может рассматриваться как гарантия безопасности дренажа для соседних сооружений. Пожалуй, единственным основанием для введения рассматриваемого норматива Правил послужила простота его применения.

Практика дренажной защиты подземных сооружений в г. Баку, где этот вид защиты получил большое развитие (общее протяжение защищаемых дренажем кабелей связи, силовых кабелей, газопроводов и нефтепроводов достигает 100 km), заставила найти иной способ контроля безопасности дренажной защиты. Лабораторией токов в земле Азербайджанского индустриального института разработана методика контроля влияния дренажей, заключающаяся в следующем:

В районах дренажных пунктов по плану подземных сооружений устанавливаются наиболее приближающиеся к дренируемым сооружениям трубопроводы и кабели, на которых могут ожидаться опасные проявления. Производя измерения потенциалов и плотностей тока утечки в намеченных пунктах при включенных и отключенных дренажах, можно получить результаты, подобные тем, что приведены выше. Варьируя ток дренажей и включение различных дренируемых объектов, можно составить полную картину работы дренажей, выясняющую не только влияние дренажей на незащищенные объекты, но также и влияние их друг на друга, что в практике дренажной защиты также имеет большое значение [Л. 2]. Табл. 5 показывает, насколько может помочь выяснению влияния дренажей подобное исследование. В этой таблице указаны потенциалы и токи утечки при включенных дренажах в процентах от величин, полученных при отключенных дренажах; токи в дренажах показаны в процентах от средних эксплоатационных величин.

Результаты группового исследования показывают, какие из подземных сооружений и в какой

мере подвергаются влиянию дренажей. В соответствии с результатами обследования могут быть сделаны и выводы как о дальнейшем регулировании дренажей, так и о мероприятиях по устранению опасных влияний, если таковые будут обнаружены (устройство изолирующего покрытия, перенос дренажной точки и т. п.).

Переходя к вопросу о *нормативах*, обеспечивающих безопасность применения защиты, мы должны прийти к заключению, что нормироваться должна не какая-либо физическая величина на дренируемом сооружении, а некоторые параметры, характеризующие качественно и количественно самое влияние. Об этом свидетельствует и опыт защиты; это вытекает также из существа вопроса.

Таблица 5

Средняя таблица влияний дренажей на соседние подземные сооружения

№ узлов	Объект измерений	Изменение величины, %		Ток в дренаже, в % от номинального
		потенциал относительно земли	плотность тока утечки	
1	500-mm водопровод	108	65	130
	400-mm водопровод	101	—	130
	Ответвление водопровода	840	—	130
	Кабель городской сети	100	—	130
2	Водопровод морской воды	120	101	175
	600-mm водопровод	138	110	175
	Газопровод	140	—	175
	Кабель городской сети	90	—	175

В качестве рациональных условий безопасности дренажной защиты могут быть установлены следующие положения:

1. Если потенциал соседнего сооружения относительно земли при отключенном дренаже отрицателен, он не должен становиться положительным при включенном дренаже. Иначе говоря, не допускается в результате действия дренажа перемена потенциала на соседних сооружениях с отрицательного на положительный.

2. Если потенциал соседнего сооружения относительно земли положителен и при включении дренажа величина его возрастает,— это возрастание не должно превосходить 0,1 V.

3. Всякое снижение потенциала соседнего сооружения, т. е. уменьшение абсолютной величины его при положительном значении, перемена положительного знака на отрицательный, увеличение абсолютной величины при отрицательном знаке — в пределах до —1 V, является допустимым.

Первое положение вытекает из основной особенности коррозии металла в почве, заключающейся в том, что при отрицательном потенциале металл защищается от коррозии, а при положительном разрушается. Допущение увеличения положительного потенциала на 0,1 V обосновывается значительными колебаниями всех электрических величин в поле блуждающих токов и незначительной точностью самих измерений. Установленное путем измерений изменение в пределах 0,1 V может не соответствовать действительному изменению условий, кроме того, разрушающий эффект (при том же знаке потенциала) возрастает значительно медленнее увеличения потенциала. Таким образом, ограничение увеличения потенциала величиной 0,1 V в практических условиях может рассматриваться как обеспечение безопасности влияния. Наконец, ограничение отрицательного потенциала связано с опасностью возникновения на свинцовых оболочках кабелей *катодной коррозии* и вредным влиянием на защитные покрытия трубопроводов.

От введения в нормы плотности тока утечки, несмотря на все преимущества этой величины как характеристики интенсивности коррозии, мы воздерживаемся из-за сложности соответствующих измерений в производственных условиях.

Контроль влияния дренажей согласно предлагаемым нормам и осуществляемый описанным выше методом является более сложным, чем предписываемый существующими Правилами. Однако, его применение вполне под силу организациям, эксплоатирующим дренажи и имеющим всю необходимую аппаратуру и персонал. Измерения не отличаются от тех, которые производятся при обычном контроле и регулировании дренажей. Кроме того, обследования влияния могут производиться сравнительно редко — только при установке новых дренажей и в последующем один раз в 2—3 года.

В связи с намечаемым в ближайшие годы развитием подземного городского хозяйства, особенно по линии газификации, вопрос борьбы с коррозией приобретает большое значение. Необходимость развития электрических методов защиты подземных сооружений, и в частности пересмотр в связи с этим существующих Правил защиты, была отмечена на втором совещании по газоснабжению городов, созванном в Ленинграде в начале текущего года [Л. 3]. Устранение недостатков в существующих Правилах должно сыграть положительную роль в деле дальнейшего усовершенствования и развития электрических методов защиты подземных металлических сооружений от коррозии.

Литература

1. В. С. Кальман. Электрическая защита подземных металлических сооружений от коррозии. Наркомхоз РСФСР, 1940.

2. Исследование дренажной защиты подземных металлических сооружений от блуждающих токов в г. Баку. Энергетический институт Азербайджанской Академии наук, 1946.

3. Вопросы газификации. Сборник 5, ВНИТОЭ, 1947.

◇ ◇ ◇

Защита телеграфных связей от влияния электрических железных дорог постоянного тока

Доктор техн. наук М. И. МИХАЙЛОВ

Научно-исследовательский институт связи Министерства связи СССР

Электрические железные дороги постоянного тока оказывают серьезные помехи нормальной эксплоатации однопроводных телеграфных связей. Рассматриваются два метода снижения помех и приводятся результаты экспериментальной проверки эффективности их действия.

Искажение, а иногда и полное прекращение телеграфной передачи, происходит из-за появления посторонних токов в телеграфных цепях. Основными источниками этих токов для однопроводных телеграфных цепей могут быть:

1) линии несимметричных электрических систем переменного тока, создающие в окружающей среде неуравновешенные переменные электрические и магнитные поля (линии передачи энергии, телеграфные цепи, контактные сети электрических железных дорог и т. п.);

2) электрические системы постоянного тока, использующие землю частично или полностью в качестве обратного провода (электрические железные дороги постоянного тока, распределительные сети постоянного тока и т. п.);

3) земные токи, протекающие в земле во время магнитных бурь.

Помехи, вызываемые индуктивным влиянием соседних телеграфных проводов или линий передачи переменного тока, имеют периодически меняющуюся форму кривой тока; помехи, вызываемые влиянием земных токов магнитных бурь и блуждающих токов электрических железных дорог, имеют своеобразный непериодический характер.

Гальваническое влияние электрических железных дорог постоянного тока на телеграфные однопроводные цепи. Электрические железные дороги постоянного тока с воздушной контактной сетью являются электрическими системами, у которых обратный ток возвращается частично по рельсам и частично по земле. Величины токов в рельсах и в земле не остаются постоянными по всей длине между тяговыми подстанциями и электровозами. На перегоне между двумя тяговыми подстанциями с одним электровозом ток в рельсах будет максимальным в местах соприкосновения колес электровоза с рельсами и около тяговых подстанций вблизи отсасывающих фидеров. Минимальное значение тока в рельсах будет ближе к середине расстояния между тяговыми подстанциями и электровозом.

Токи в земле—«блуждающие токи», ответвляющиеся от рельсов, по мере удаления от электровоза, постепенно нарастают. В различных точках земли около рельсов плотность блуждающих токов будет различной; в одной и той же точке земли плотность тока может меняться не только по величине, но и по знаку в зависимости от движения электровоза.

Ввиду того что земля имеет удельное сопротивление, колеблющееся от 200 до $10^6\,\Omega\cdot$cm и более, то при прохождении по ней блуждающих токов земля будет обладать потенциалом φ. Если обозначить плотность тока в земле через δ, проводимость земли через γ и напряженность электрического поля в земле через E, то $\delta=\gamma E$, $E=-\operatorname{grad}\varphi$, следовательно,

$$\left.\begin{aligned} \delta=-\gamma\operatorname{grad}\varphi;\ \operatorname{grad}\varphi=-\frac{\delta}{\gamma},\\ \operatorname{grad}\varphi=\frac{d\varphi}{dx};\ d\varphi=-\frac{\delta}{\gamma}\,dx. \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

Потенциал в точке a, отстоящей от источника тока в земле на y cm,

$$\varphi_a=\int\limits_{x=y}^{x=\infty} d\varphi_a=-\int\limits_{x=y}^{x=\infty}\frac{\delta}{\gamma}\,dx. \qquad (2)$$

Для решения этого интеграла необходимо знать плотность тока в рассматриваемой точке. Согласно теории заземлителя эта величина является функцией величины общего тока, входящего в землю через заземлитель, расстояния x от этой точки до заземлителя, формы заземлителя и его положения в земле. Рельсы, через которые при движении электровозов проходят токи в землю, являются своего рода протяженными заземлителями и, следовательно, источником со-

здания потенциалов на поверхности земли около полотна электрифицированной железной дороги.

В земле по обе стороны железной дороги между электровозом и тяговыми подстанциями будут существовать электрические поля. Если обе или одна из двух телеграфных станций, работающие по однопроводной системе, будут расположены в зоне электрического поля земли (зона распространения блуждающих токов), то под действием разности потенциалов земли в проводах возникают токи помех гальванического влияния.

При определении мешающих токов необходимо иметь в виду два характерных случая расположения телеграфных станций: 1) телеграфная линия расположена вдоль электрифицированного участка железной дороги и обе конечные станции находятся в пределах электрифицированного участка; 2) телеграфная линия перпендикулярна к полотну электрифицированного участка или направлена в противоположную сторону от электрифицированного участка, причем оконечная телеграфная станция находится в зоне этого участка.

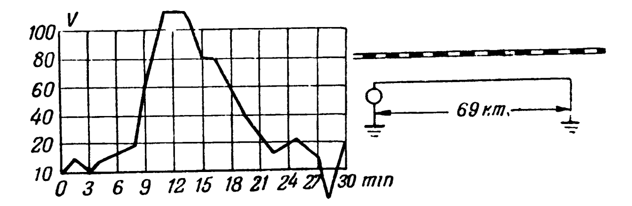
В первом случае каждое заземление телеграфной станции будет обладать потенциалами; величина и знак последних зависят от графика движений электропоездов, от удельной проводимости земли, от способа питания контактной сети (параллельное или раздельное включение подстанции), от расположения телеграфных станций по отношению к полотну железной дороги.

Потенциалы заземлителей телеграфных станций могут быть различными по величине и знаку. В телеграфном проводе, соединяющем две точки земли — заземлители телеграфных станций, возникают уравнительные токи, изменяющиеся в прямой пропорциональности от изменения разности потенциалов $[(\mp\varphi_1) - (\mp\varphi_2)]$.

Абсолютные значения φ_1 и φ_2 при значительном расстоянии между телеграфными станциями могут колебаться от 0 до φ_{max} независимо друг от друга. Практически на заземление телеграфной станции в основном влияет близлежащая тяговая подстанция. Следовательно, мешающие токи в телеграфном проводе могут иметь разные значения и менять свое направление.

На рис. 1 показаны изменения мешающих напряжений, измеренные нами в телеграфных проводах, идущих вдоль электрической железной дороги при расположении телеграфных станций около полотна дороги.

В том случае, если одна из телеграфных станций расположена около электрифицированного участка железной дороги и все остальные, соединенные проводами с первой, находятся вне зоны влияния этого участка железной дороги ($\varphi_2=0$), то во всех телеграфных проводах, соединяющих подверженную влиянию телеграфную станцию со всеми остальными, появятся токи помех или мешающие напряжения. Примером таких мешающих напряжений в телеграфных проводах могут



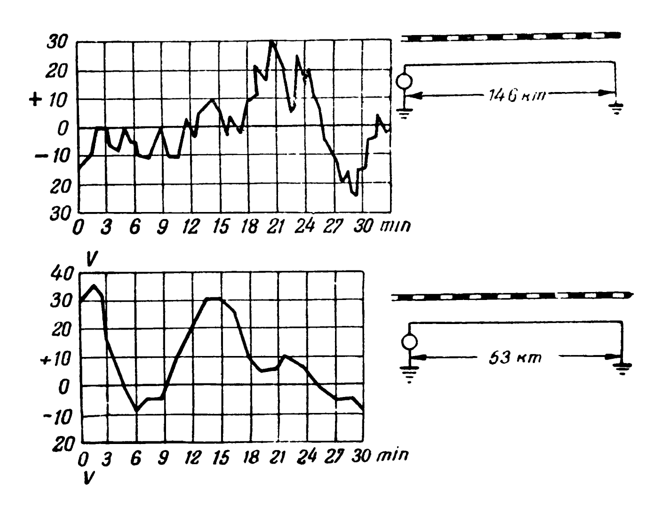


Рис. 1.

служить величины, измеренные в проводах одного телеграфного узла, соединяющих этот узел с пунктами, расположенными вне зоны гальванического влияния, электрифицированного участка железной дороги (рис. 2); (длины проводов для графика *а* — 379 km, *б*—223 km, *в*—325 km, *г* — 60 km и для графика *д* — 25 km).

Измерения показывают, что напряжения помех в телеграфных однопроводных цепях от гальванического влияния электрических железных дорог могут достигать 10 ÷ 50 V при нормальной эксплоатации железной дороги и 100 ÷ 150 V при отключении подстанции, близлежащей к телеграфной станции.

Рабочие напряжения источников тока телеграфной связи в зависимости от длины телеграфной цепи имеют значения 40; 60; 80; 120 V; очевидно, что указанные выше напряжения помех не могут быть допущены. Необходимо принимать мероприятия, которые бы могли обеспечить нормальную эксплоатацию однопроводных телеграфных связей.

Нами были опробованы два метода защиты телеграфных дуплексных связей от гальванического влияния электрических железных дорог постоянного тока:

1. Метод, предложенный М. Я. Костюковым: линейные токи телеграфной цепи действуют на приемные реле через магнитную связь с применением пушпульного усилителя.

2. Метод, предложенный автором: заземления телеграфных станций выносятся от полотна электрической железной дороги на соответствующие расстояния.

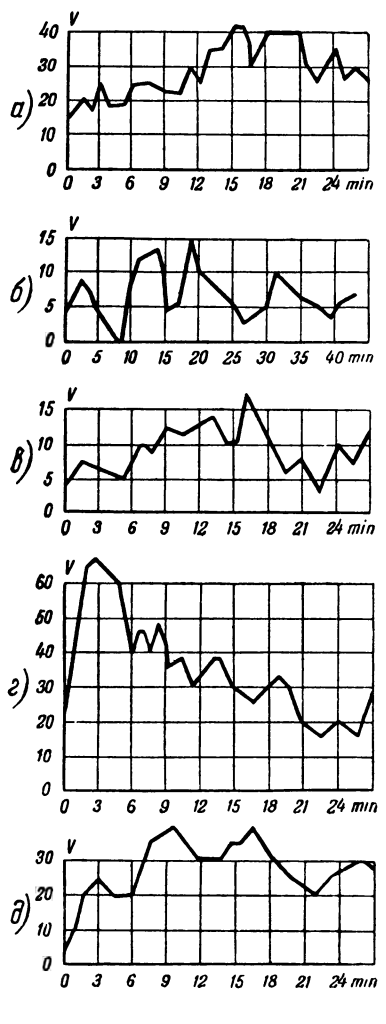


Рис. 2.

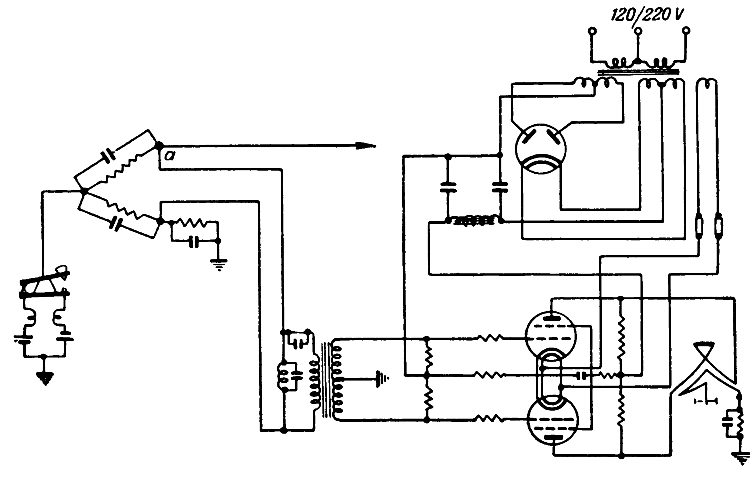


Рис. 3.

Защита с помощью трансформатора. Принципиальная схема защиты, предложенная М. Я. Костюковым, показана на рис. 3. Здесь дуплексная телеграфная связь осуществляется по мостиковой схеме. В диагональ моста вместо телеграфного реле включена первичная обмотка переходного трансформатора. Во вторичную обмотку этого трансформатора включается усилитель и приемное реле. С целью снижения индуктивного влияния соседних телеграфных цепей параллельно первичной обмотке трансформатора включается контур, состоящий из параллельно соединенных катушки индуктивности и конденсатора. Во вторичную обмотку переходного трансформатора включается пушпульный усилитель импульсов, на выходе последнего включается реле. Противоиндукционный контур может быть построен таким образом, что действие токов индукции будет максимально снижено. Полезный сигнал при этом будет также несколько уменьшаться. Однако, благодаря наличию усилителя полезный сигнал восстанавливается до требуемых величин.

Токи индукции уменьшаются примерно в 6÷8 раз при снижении получаемого сигнала всего лишь в 1,5—2 раза. Таким образом, на выходе усилителя соотношение между величинами рабочего сигнала и токами индукции будет достаточно хорошим и приемное реле будет работать вполне устойчиво.

Токи индукции, поступающие с линии и имеющие обычно пикообразную форму и продолжительность во времени не более 0,25÷0,3 длины рабочего сигнала, будут в основном замыкаться через противоиндукционный контур; однако, часть тока индукции, как указывалось выше, все же будет поступать в первичную обмотку трансформатора и, будучи усилена, может вызывать произвольные срабатывания приемного реле в промежутках между рабочими импульсами. Во избежание этого якорь приемного реле должен быть блокирован токами местной батареи.

Посторонние токи, возникающие в линии вследствие гальванического влияния электрических железных дорог или вследствие влияния магнитных бурь, будут подобно рабочим токам в точке «*а*» разветвляться; величины токов ответвляющихся с одной стороны — через одно плечо моста, передатчик и в землю, с другой стороны, — через первичную обмотку трансформатора, дроссель противоиндукционного контура, второе плечо моста, передатчик и в землю, будут обратно пропорциональны активным сопротивлениям этих цепей.

Так как токи помех гальванического влияния электрических железных дорог постоянного тока и токи от магнитных бурь имеют небольшую скорость изменения, то, протекая по первичной обмотке трансформатора, они не смогут индуктировать э. д. с. достаточной величины во вторичной его обмотке.

Если постоянные токи помех через обмотку трансформатора не будут достигать величин, при которых железо трансформатора могло бы быть намагничено до насыщения, приемное реле будет работать одинаково как при отсутствии токов помех, так и при наличии их в телеграфной цепи.

Подбирая параметры дросселя противоиндукционного контура, можно достичь желаемых результатов в отношении предельных токов через обмотку трансформатора.

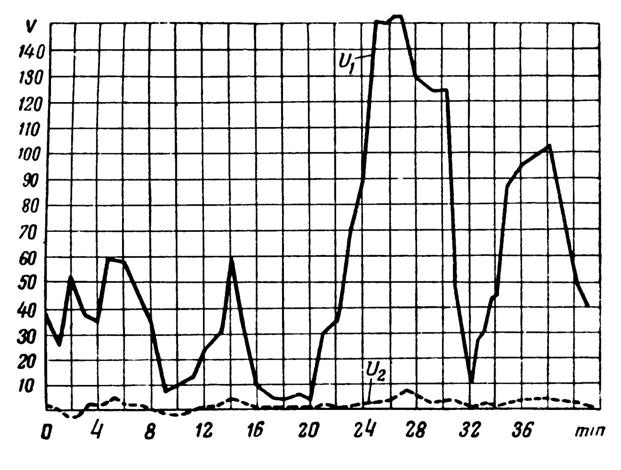


Рис. 4.

В СССР наблюдались токи помех в телеграфных цепях от гальванического влияния электрических железных дорог до 100 mA (например, на Урале), а при магнитных бурях до 150 mA, поэтому был изготовлен прибор, защищающий телеграфные связи от искажений при токах помех до 150 mA.

Испытания прибора в лабораторных и эксплоатационных условиях на одной телеграфной линии Урала показали, что телеграфная связь при включении прибора М. Я. Костюкова не прекращается при мешающих токах до 150 mA.

Недостатки рассмотренного способа защиты:

а) для каждой телеграфной связи, требующей защиты, необходима установка двух аппаратов — на приемном и передающем концах;

б) каждый аппарат защиты требует для питания усилителей мощностью до 18 W;

в) для устойчивой работы приемной части дуплексной связи с аппаратами Бодо при включении аппарата защиты требуется тщательная установка щеток на распределительном диске;

г) включенные аппараты защиты вызывают некоторые усложнения эксплоатации телеграфной связи.

Защита телеграфных связей путем выноса заземлений телеграфных станций. Автором предложено для снижения напряжений, а следовательно, и мешающих токов в телеграфных связях воспользоваться свойством уменьшения потенциала земли по мере удаления от полотна электрифицированной железной дороги.

Если отнести заземление телеграфных станций, работающих по однопроводной системе, от полотна электрических железных дорог, на соответствующие расстояния, то тем самым можно снизить токи помех до допустимых величин.

Относ заземлений будет различным в зависимости от состояния полотна железной дороги, от состояния стыковых соединений, от действующей мощности тяговых подстанций, от величины удельного сопротивления земли и ее геологического строения. Учет этих факторов теоретическим путем чрезвычайно затруднителен. В каждом конкретном случае можно определить расстояние для выноса заземлений экспериментальным путем.

Для снижения помех в телеграфных связях, имеющих в зоне влияния электрической железной дороги одну телеграфную станцию, требуется вынести заземление только одной этой станции, тогда как для связей с расположением в зоне электрической железной дороги обеих телеграфных станций требуется вынос заземлений каждой из этих двух станций.

Выяснение защитного действия „выноса“ заземления телеграфной станции, соединенной с телеграфными пунктами, расположенными вне зоны влияния, проводились с помощью двух вольтметров. Отношение показаний первого вольтметра U_1 и второго вольтметра U_2 можно назвать к о э ф ф и ц и е н т о м с н и ж е н и я п о м е х:

$$k=\frac{U_1}{U_2}.$$

Первый вольтметр включается в телеграфный провод между заземлениями телеграфных станций, а второй — между удаленной телеграфной станцией и вынесенным заземлением от полотна электрической железной дороги у первой телеграфной станции.

С изменением расстояния x до вынесенного заземлителя будет меняться показание U_2, а следовательно, и коэффициент k.

Измерения, проведенные на Урале, показали, что при относе заземления на 13 km снижение помех в среднем не превышает $1{,}5 \div 3$; при относе заземления на 25 km коэффициент снижения достигает в среднем значения 10, а при относе на 48 km — 15. Относительно медленное снижение помех, несмотря на значительное удаление заземления телеграфной станции, объясняется наличием в районе измерений большого удельного сопротивления земли ($\rho_v = 1\cdot10^6 \div 2\cdot10^6$ MΩ·cm).

Для примера защитного действия „выноса заземления“ телеграфных станций на рис. 4 показаны результаты измерения помех в телеграфной цепи, расположенной вдоль электрической железной дороги. Кривая U_1 представляет собой помехи в цепи без защитного мероприятия; кривая U_2 — помехи при выносе заземлений одной телеграфной станции на 25 km и второй — на 40 km в перпендикулярном направлении к полотну железной дороги.

Измерения разности потенциалов между рельсами электрических железных дорог и точками земли на различных расстояниях от полотна железной дороги, проведенные нами в других местностях Советского Союза, с более низкими удельными сопротивлениями грунта, показывают, что при ($\rho = 2\,000$ Ω·cm) вынос заземления требуется всего лишь на 200 m, а при $\rho = 10\,000$ Ω·cm — на $1\,000 \div 1\,500$ m.

Провод, соединяющий телеграфную станцию с вынесенным заземлителем, должен иметь соответствующее сечение и материал. Сопротивле-

ние этого соединительного провода входит в общую величину допустимого сопротивления заземления:

$$R_з = \frac{1-A}{An-1} r,$$

где r — сопротивление провода телеграфной цепи;

n — число телеграфных проводов равного сопротивления;

$A = \frac{I}{I_1}$ — отношение значения тока в одном проводе при выключении всех соседних телеграфных проводов, к значению тока в том же проводе при включении всех других проводов данной телеграфной станции;

$R_з = R_{зз} + R_{пр}l$ — общее сопротивление заземляющего устройства телеграфной станции, состоящей из сопротивления заземлителя ($R_{зз}$) сопротивления подводящего провода ($R_{пр}l$).

Величина сопротивления подводящих проводов вынесенного заземлителя определяется на основании технико-экономических подсчетов вынесенного заземлителя.

К преимуществам метода защиты с выносом заземлений следует отнести:

1) простоту осуществления этого способа защиты; 2) возможность применения материалов, которые легко могут быть найдены на местах осуществления защиты; 3) возможность одновременно защитить все телеграфные связи данной телеграфной станции; 4) необходимость выноса заземления только для той телеграфной станции, которая находится в зоне влияния электрической железной дороги.

Недостатки этого способа защиты:

1) невозможность защиты телеграфных связей от токов помех магнитных бурь; 2) усложнение эксплоатации заземляющего устройства, в особенности в местах с большим удельным сопротивлением земли (свыше $10^5\,\Omega$ cm), где заземление станции должно быть отнесено от полотна железной дороги на $10 \div 30$ km.

Выводы. При защите телеграфной связи от влияния электрических железных дорог постоянного тока, более простым для осуществления является способ, предложенный автором, — «вынос заземления телеграфных станций».

Аппарат защиты, изготовленный по схеме М. Я. Костюкова, можно рекомендовать только в единичных случаях на наиболее ответственных магистральных телеграфных связях в районах с большими величинами помех, возникающих при магнитных бурях.



Вопросы электрической тяги на научно-технической конференции ВНИИЖТ

В мае с. г. на научно-технической конференции Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта Министерства путей сообщения СССР в **секции электрификации железных дорог** были заслушаны доклады по работам Института за 1947 г. в области электрической тяги.

Кандидат техн. наук **М. А. Чернышев** в докладе «Развитие теории инвертирования тока и основные характеристики рекуперативной схемы» отметил, что характеристики рекуперативной схемы, полученные им как при одиночной работе инвертора, так и при его работе параллельно с выпрямителем, оказались отличными от характеристик, предложенных теорией. В результате исследования получено уравнение «парциальной» характеристики выпрямителя, работающего параллельно с инвертором, выведено уравнение циркуляционного тока для этого случая и составлена формула для определения мешающего напряжения выпрямительно-инверторной установки.

В докладе инж. **И. И. Рыкова** «Разрядники постоянного тока для защиты от перенапряжений устройств электрической тяги» приведено сравнение различных конструкций разрядников постоянного тока, нашедших применение для защиты электроподвижного состава и тяговых подстанций и отмечены их недостатки. Испытание разрядников постоянного тока на 3 kV, разработанных ВЭИ, производилось при токах в дуге от 6 до 35 A и при однократных и многократных (до 105) зажиганиях. Время горения дуги не превышало 0,009 sec. Испытания показали, что разрядник ВЭИ представляет совершенную конструкцию, которую следует в ближайшее время распространить на железных дорогах.

Инж. **И. М. Ершов** в докладе «Защита сооружений от коррозии блуждающими токами» сделал краткий обзор работ Института в этой области, остановившись на работах последних лет и, в частности, на технических указаниях по проектированию защиты кабелей и трубопроводов от коррозии блуждающими токами и почвенной коррозии.

Кандидат техн. наук **А. В. Воронин** в докладе «Тепловой расчет контактной сети электрических железных дорог» предложил методику, ускоряющую и упрощающую тепловой расчет при сохранении его точности. Сравнительные расчеты показали, что температуру перегрева проводов контактной сети следует определять по кривой проводов тока за период интенсивной нагрузки, так как расчеты по среднему и по квадратичному току дают большую ошибку. Особой проверке следует подвергать сеть станционных путей, где при определенных условиях перегрев проводов может иметь место при разгоне поезда.

Кандидат техн. наук **И. И. Власов** в докладе «Повышение надежности работы контактной сети и выбор типа контактной подвески» на основе анализа данных по эксплоатации контактной сети за ряд лет указал на слабые места в контактной подвеске электрифицированных железных дорог и перечислил мероприятия по улучшению отдельных конструкций и узлов.

В докладе «Двойная цепная подвеска» инж. **Л. А. Вислоух** проанализировал особенности расчета системы двойной цепной подвески и привел ряд рекомендаций по методике расчета.

Доклад инж. **Г. А. Петрова** «Результаты испытаний электросекций СР» охарактеризовал выпущенное заводом «Динамо» им. Кирова для этой серии электросекций оборудование и аппаратуру, превосходящую во многих отношениях заграничные.

Инж. Л. А. ВИСЛОУХ

Авторефераты



К вопросу об областях применения постоянного тока при передаче энергии на большие расстояния

Инж. А. Н. ЗЛАТОПОЛЬСКИЙ

Энергетический институт им. Кржижановского Академии наук СССР

Технические и экономические характеристики постоянного тока высокого напряжения позволяют использовать его для: 1) передачи больших мощностей на дальние расстояния; 2) связи крупных электроэнергетических систем, не могущих по условиям устойчивости и токов к. з. работать синхронно; 3) передачи электроэнергии по высоковольтным кабельным линиям через водные преграды и в центры городов; 4) объединения систем, работающих на разных частотах. При выборе рода тока необходимо учитывать, что линия постоянного тока не может быть использована для питания изолированного потребителя, а также не допускает производства отпаек.

Первый из перечисленных выше пунктов является наиболее общим и требуется установление зоны применения системы постоянного тока высокого напряжения при передаче энергии в пункты потребления, имеющие собственные источники питания.

На основе технического сравнения двух систем тока К. А. Круг пришел к выводу, что при передаче энергии переменным током на расстояние свыше 500 km требуются специальные устройства для поддержания устойчивости, что связано с большими дополнительными капитальными вложениями [Л. 1]. П. С. Жданов в своей работе отмечает, что экономические преимущества постоянного тока ограничивают перспективы развития электропередачи переменного тока расстоянием порядка 500—600 km [Л. 2].

В статьях, посвященных экономическому сравнению передачи энергии на постоянном и переменном токе [Л. 3, 4], приводятся кривые стоимости линий электропередачи в зависимости от мощности (рис. 1). Из сопоставления следует, что при наличии возможности передачи энергии в аварийных условиях по одному проводу и земле линия на постоянном токе дешевле на 55—60% по сравнению с линией трехфазного тока. При отсутствии возможности такой передачи линия постоянного тока должна сооружаться четырехпроводной—удешевление составляет 33—38%. Экономическая граница передачи энергии постоянным током [Л. 4] определяется длиной в 400 km; она была определена из условия равенства стоимостей передачи 1 kWh для двух систем тока. На рис. 2 кривая *1* отображает стоимость передачи энергии переменным током в зависимости от длины передачи, а кривая *2* — то же для передачи постоянным током.

Метод расчета, принятый Эреншпергером не является убедительным, так как: 1) в основе экономических расчетов лежат обычные методы частнохозяйственной капиталистической калькуляции. Капитальные затраты в эксплоатационных расходах учитываются в виде процента на

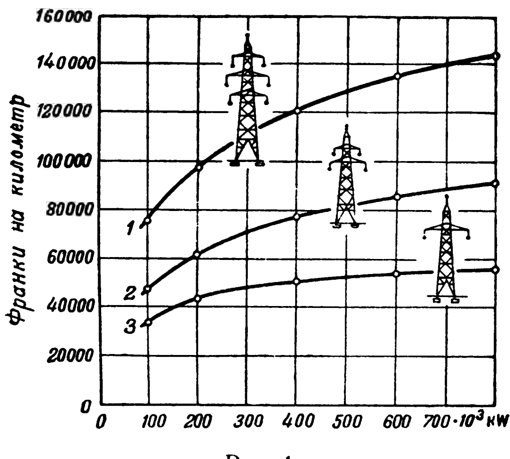


Рис. 1.

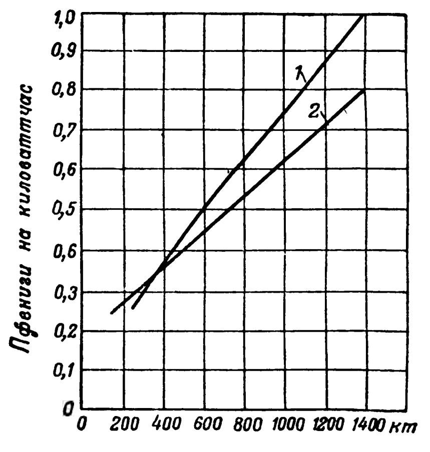


Рис. 2.

капитал; 2) определялось одно единственное значение длины линии, разграничивающее область передачи энергии; а не расчетная зона, особенно необходимая в условиях отсутствия надежных эксплоатационных показателей по системе постоянного тока; 3) расчеты даны для случая одинаковых потерь энергии (1%) на 100 km. При таком сравнении нельзя выявить особенности, обусловленные разными системами тока в отношении потерь энергии в линиях электропередачи.

При анализе рассматриваемого вопроса необходимо сопоставить системы постоянного и переменного токов высокого напряжения при одинаковых условиях. Это достигается на основе следующих равных показателей: 1) передаваемая мощность (при переменном токе — натуральная мощность); 2) длина передачи; 3) использование проводникового металла; 4) надежность; 5) уровень изоляции.

Особенности рассматриваемых систем тока в отношении потерь энергии выявляются лишь при одинаковом коэффициенте использования проводникового металла, под которым понимается отношение расчетной плотности тока к плотности тока, соответствующей нагреву. При этом каждый килограмм металла, вложенного в сеть, используется одинаково вне зависимости от принятой системы тока.

Принятие при сопоставлении равных плотностей токов и тем более одинакового процента потерь энергии на километр не позволяет выявить особенности постоянного и трехфазного тока и ставит эти системы в неодинаковые условия. Поэтому целесообразно в таких расчетах принять использование проводникового металла одинаковым, так как при этом можно установить различие в потерях энергии и привести рассматриваемые системы тока к одинаковым условиям.

Сравнение линии электропередачи при одинаковом уровне изоляции позволяет оценить возможность перехода на более высокое напряжение при системе постоянного тока по сравнению с системой переменного тока, а следовательно, и снижение потерь энергии и, как и в предыдущем случае, ставит рассматриваемые системы тока в равные условия.

Область передачи больших мощностей на дальние расстояния можно разделить на три зоны: 1) переменного тока; 2) постоянного тока; 3) промежуточную.

Для определения границ отдельных зон используем следующие положения:

1. Система постоянного тока требует относительно больших капитальных затрат на подстанции и сравнительно малых на сооружение 1 km линии, чем при системе трехфазного тока. Поэтому можно найти такую длину передачи, при которой капитальные затраты по двум системам передачи сравняются [1].

2. Для системы постоянного тока характерны относительно большие эксплоатационные расходы на подстанции и малые на 1 km линии, чем при системе переменного тока. Следовательно, можно также определить длину передачи, при которой суммарные эксплоатационные расходы сравняются.

Таким образом, мы получим: 1) зону, в которой капитальные затраты и эксплоатационные расходы при системе постоянного тока выше — зона переменного тока; 2) зону, в которой капитальные затраты и эксплоатационные расходы при системе переменного тока выше, — зона постоянного тока; 3) зону, в которой большим капитальным затратам противостоят меньшие эксплоатационные расходы при переходе от системы трехфазного тока к системе постоянного тока,— промежуточная зона.

Отсутствие в настоящее время надежных данных о стоимости преобразователей и высоковольтных линий передачи не позволяет провести точный сравнительный подсчет. Использование соотношений стоимостей для двух систем передачи дает возможность несколько смягчить это положение. На рис. 3 схематически представлены кривые K_{I}, K_{II} и $\Delta э_{I}$, $\Delta э_{II}$, представляющие соответственно отношение капитальных затрат и эксплоатационных расходов при системе трехфазного тока к тем же показателям при системе постоянного тока (C). Зависимости даны для двух вариантов: I — двухпроводная линия постоянного тока с заземленной средней точкой и двухцепная линия трехфазного тока на одной опоре с расположением проводов обратной елкой ($\Delta э_{I}$, K_{I}); II—две двухпроводные линии постоянного тока и двухцепная линия переменного тока (связанный вариант $\Delta э_{II}$, K_{II}).

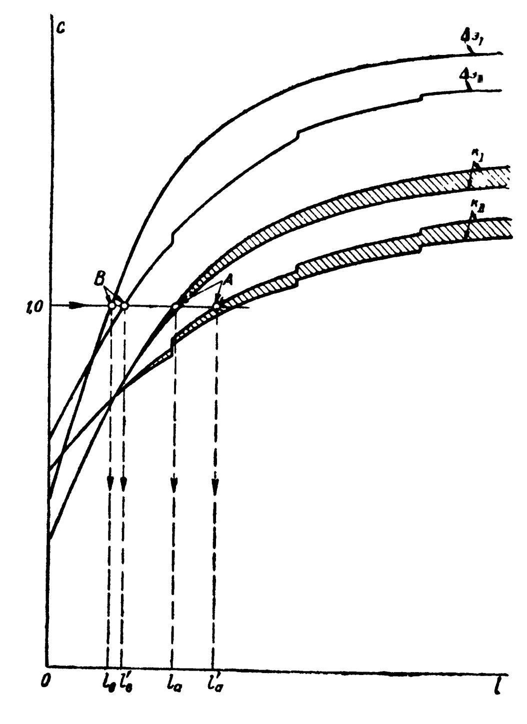


Рис. 3.

[1] При подсчете капитальных затрат необходимо учитывать стоимость дополнительной генерирующей мощности, а также расходы на добычу и транспорт топлива, на покрытие разницы в потерях энергии.

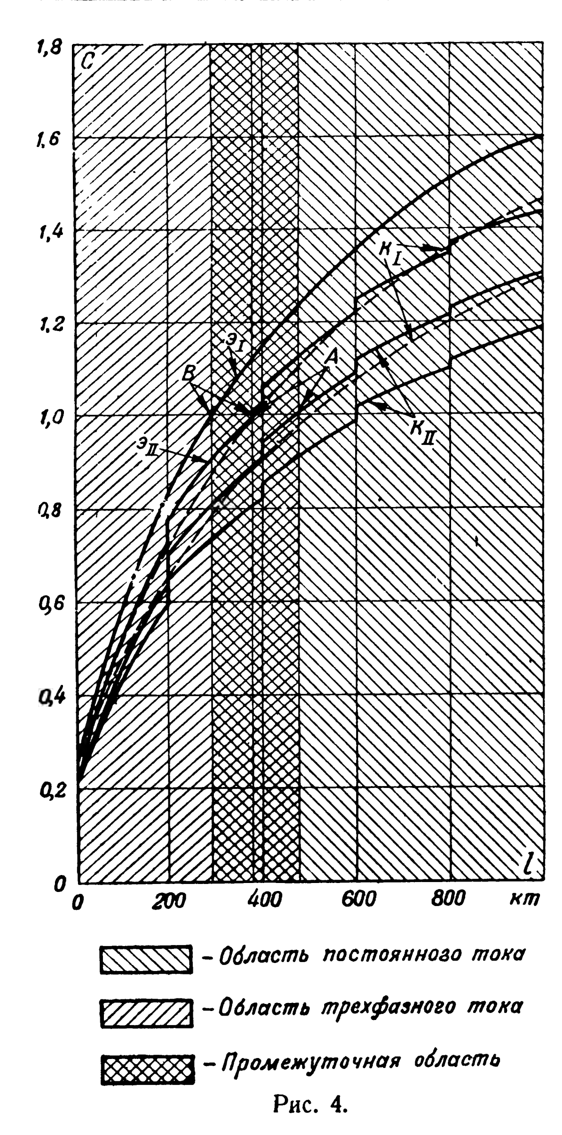


Рис. 4.

Пересечение рассматриваемых кривых с прямой $C=1$ определяет длины линий передачи, при которых капитальные затраты или эксплоатационные расходы сравняются.

Точки A соответствуют равенству капитальных затрат, т. е. начиная с длины передачи l_a или l'_a (для разных вариантов) система передачи постоянным током требует меньших капитальных затрат и эксплоатационных расходов при значительно более низких потерях энергии. Вертикальные линии, проходящие через точки A, отсекают, таким образом, зону справа, в которой и по капитальным затратам и по эксплоатационным расходам целесообразно применять систему передачи энергии постоянным током (заштрихованные площадки при кривых K_{I} и K_{II} представляют собой дополнительные затраты на покрытие разности в потерях энергии).

Точки B соответствуют равенству эксплоатационных расходов для двух систем передачи. Прямые, проходящие через точки B, отсекают зону слева, в которой по капитальным затратам и по эксплоатационным расходам более экономично применить систему передачи энергии переменным током. Следовательно, мы получили три зоны: 1) зону при длине передачи до $l_в$ или $l_в'$ — зона передачи энергии переменным током; 2) зону при длине передачи большей l_a или l'_a, в которой целесообразно применить систему передачи энергии постоянным током; 3) зону при длине передачи от $l_в$ до l_a или $l'_в$ и l'_a, в которой имеют место большие капитальные затраты, но меньшие эксплоатационные расходы при системе передачи постоянным током по сравнению с системой передачи энергии трехфазным током.

На основании предложенной методики была рассмотрена в качестве примера передача 200 000 kW. Зона переменного тока определилась длиной линии электропередачи до величины порядка 400 km. Зона постоянного тока при длине линии электропередачи более 400—500 km и промежуточная зона — от 300 до 400 km и от 400 до 500 km (рис. 4).

Абсолютные значения приведенных цифр являются приближенными ввиду недостаточной надежности исходных стоимостных данных. Границы отдельных зон будут перемещаться в зависимости от тех новых технических решений, которые появятся как в системе постоянного тока, так и трехфазного тока.

Работа автора по исследованию межрайонного объединения электросистем, извлечение из которой представляет настоящий автореферат, проведена под научным руководством члена-корр. Академии наук СССР В. И. Вейца. При просмотре рукописи ряд ценных замечаний был сделан доктором техн. наук проф. П. С. Ждановым и кандидатом техн. наук Я. М. Червоненкисом.

Литература

1. К. А. Круг. Проблема передачи электроэнергии на сверхдальние расстояния Электричество, № 3, 1946.

2. П. С. Жданов. Перспективы передачи электроэнергии переменным током на большие расстояния. Электричество, № 4, 1946.

3. C. H. Ehrensperger. Probleme der gleichstrom Energieübertragung. Büll. ASE, № 6, 1942.

4. C. H. Ehrensperger. Einige gegenüberstellungen der Energieübertragungen mit Drehstrom oder gleichstrom. BBM, №9, 1945.

5. D. C. transmission — actively contemplanted in Europe. El. World, August, № 9, 1946.

◇ ◇ ◇

Применение теории вращающихся полей к анализу асинхронной машины с однофазным статором и ротором

Доктор техн. наук, проф. П. А. СВИРИДЕНКО

Москва

Анализ режимов с двухсторонней несимметрией является трудной и относительно мало разработанной задачей теории электрических машин. Значительным достижением в этой области является метод анализа синхронных несимметричных машин, разработанный Д. А. Городским [Л. 1]. Эквивалентная схема однофазной асинхронной машины с одноосным ротором была выведена путем развития метода симметричных составляющих [Л. 4]. В этой работе рассматривается применение теории вращающихся полей к анализу асинхронных машин с однофазными обмотками на статоре и на роторе, возбуждаемых как от сети, так и от конденсаторов. Физическая наглядность, общность и непосредственная связь с обычной теорией асинхронных машин отличает такой метод анализа от формальных способов. Недостатки формального решения обусловлены тем, что дифференциальные уравнения изучаемой машины имеют не постоянные, а периодически изменяющиеся коэффициенты. Более широкие возможности открываются, если применить разложение пульсирующих полей на поля вращающиеся, лежащее в основе известной теории однофазной асинхронной машины (односторонняя несимметрия), для более общего и принципиально отличного случая, когда однофазная обмотка имеется и на статоре и на роторе (двухсторонняя несимметрия).

Пульсирующее магнитное поле, создаваемое током однофазной обмотки статора, разложим на два противоположно вращающихся поля половинной амплитуды, прямое поле Φ_1 и обратное поле Φ'_1.

Прямое поле статора Φ_1 вращается относительно статора со скоростью $\vec{\omega}$ и относительно ротора со скоростью $\vec{s\omega}$ где s—скольжение ротора относительно синхронно вращающегося поля статора. Оно вызывает э. д. с. и ток i_{02} в однофазной обмотке ротора с частотой sf, где f—частота приложенного напряжения. Создаваемое этим током пульсирующее с частотой sf поле ротора разложим на прямое Φ_0 и обратное Φ_0' вращающиеся поля. Прямое поле ротора Φ_0 вращается относительно ротора со скоростью $\vec{s\omega}$. Скорость этого поля относительно статора равна синхронной скорости. Обратное поле ротора Φ_0', вращаясь относительно ротора в противоположном направлении, имеет скорость осносительно статора $(\overleftarrow{2s-1})\,\omega$. Это поле наводит в обмотке статора э. д. с. и ток i_{-11}, частота которых равна $(2s-1)f$. Разлагая теперь поле статора, пульсирующее с частотой $(2s-1)f$, и продолжая процесс последовательного разложения все дальше и дальше, получаем новые составляющие э. д. с. и токов с частотами $(4s-3)f$, $(6s-5)f$ и т. д. для статора и $(3s-2)f$; $(5s-4)f$ и т. д. для ротора.

Теперь рассмотрим обратно вращающееся поле статора.

Поле Φ_1' вращается относительно ротора с угловой скоростью $(\overleftarrow{2-s})\,\omega$ и индуктирует э. д. с., вызывающую ток в роторе i_2, с частотой $(2-s)f$. Этот ток создает в роторе переменное поле, пульсирующее с частотой $(2-s)f$. Это поле мы также будем рассматривать как сумму прямого Φ_2 и обратного Φ'_2 вращающихся полей.

Прямое поле ротора Φ_2 вращается в направлении, противоположном вращению ротора, с относительной скоростью $(\overleftarrow{2-s})\,\omega$. Его скорость относительно статора равна синхронной скорости, но обратна по направлению. Обратное поле ротора Φ'_2 имеет угловую скорость относительно статора $(3-2s)\,\omega$ и относительно ротора $(\overrightarrow{2-s})\,\omega$. Соответствующие этому полю э. д. с. и ток в статоре имеют частоту $(3-2s)f$. Ток статора, создаваемый равными по величине полями Φ_0 и Φ_2, вращающимися относительно статора в противоположных направлениях с синхронной скоростью, имеет частоту сети.

Производя разложение пульсирующего с частотой $(3-2s)f$ поля статора на прямое и обратное поля статора Φ_3 и Φ'_3 и продолжая этот процесс дальше, получим новые составляющие э. д. с. и токов с частотами $(5-4s)f$ $(7-6s)f$ и т. д. для статора и $(4-3s)f$, $(6-5s)f$ и т. д. для ротора.

Составленная картина основных магнитных полей и их вращения относительно статора показана на рис. 1.

Полученный спектр частот составляющих э. д. с. и токов статора и ротора выражается следующей формулой:

$$f_n = [n-(n-1)s]\,f, \tag{1}$$

где n—целое число, изменяющееся от 0 до $\pm\infty$. Для составляющих тока статора n принимает все нечетные положительные и отрицательные значения: $n = \pm\,(1, 3, 5, 7, \dots \infty)$. Для составляющих тока ротора n принимает нулевое и все четные положительные и отрицательные значения; $n = \pm\,(0, 2, 4, 6, \dots \infty)$. Частота каждой составляющей э. д. с. и тока является линейной функцией скольжения ротора. Для основных составляющих токов статора и ротора эти функции показаны на рис. 2. Только при неподвижном роторе частоты составляющих токов равны между собой.

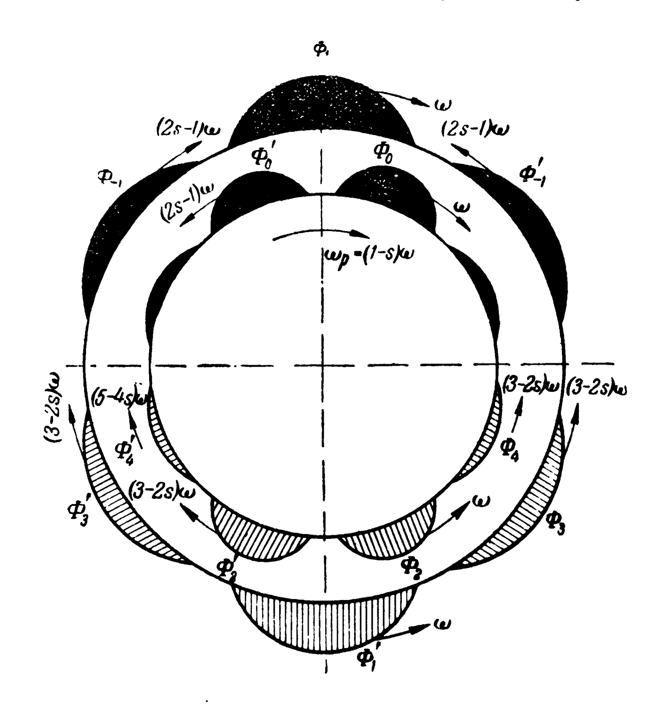


Рис. 1. Разложение пульсирующих полей на вращающиеся поля.

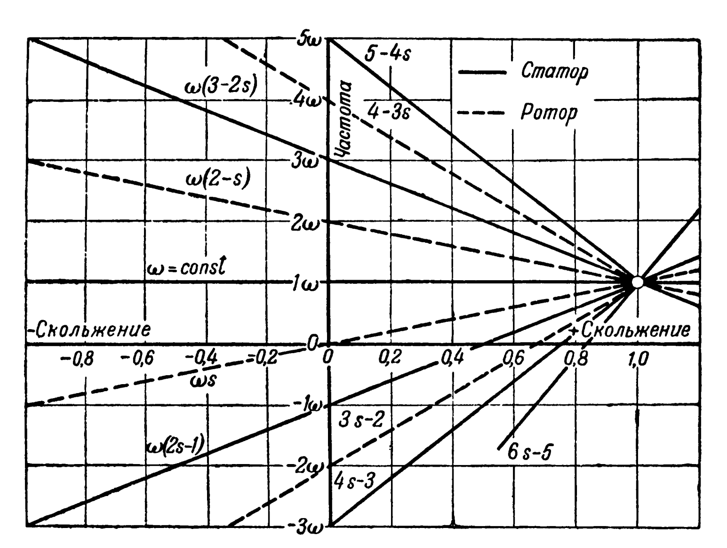


Рис. 2. Изменение частот составляющих э. д. с. и токов статора и ротора при изменении скольжения.

С увеличением скорости ротора частоты отдельных составляющих изменяются по расходящимся прямым.

Для расчета кроме частот необходимо еще знать амплитуды и фазы отдельных составляющих токов. Для этой цели составим уравнения напряжений машины, представляющие собой суммы э. д. с., падений напряжений и приложенного напряжения соответствующих частот. Введем следующие обозначения: X_1 и r_1—реактивное сопротивление рассеяния при частоте сети и активное сопротивление статора; X_2 и r_2—те же параметры ротора, приведенные к статору; X_m—главное реактивное сопротивление статора, определяемое прямым или обратным потоком в воздушном зазоре; $2X_m$—то же, но соответствующее пульсирующему полю.

Приложенное к статору напряжение сети приравняем сумме э. д. с., индуктируемых в обмотке статора: результирующим прямым полем (Φ_1 и Φ_0) и результирующим обратным полем (Φ'_1 и Φ_2) и падения напряжения в обмотке от составляющей тока статора, имеющей частоту, одинаковую с частотой приложенного напряжения:

$$jX_m(\dot I_{11}+\dot I_{02})+jX_m(\dot I_{11}+\dot I_{22})+\dot I_{11}(r_1+jX_1)=\dot U. \quad (2)$$

Второе уравнение для статора напишется в виде суммы э. д. с. с частотами $(2s-1)f$, индуктируемыми в обмотке статора, и падения напряжения в обмотке статора от тока, имеющего ту же частоту приравненной нулю, поскольку приложенное напряжение соответствующей частоты отсутствует:

$$j(2s-1)X_m(\dot I_{-11}+\dot I_{02})+j(2s-1)X_m(\dot I_{-11}+\dot I_{-22})+ \\ +\dot I_{-11}[r_1+j(2s-1)X_1]=0. \quad (3)$$

Таким же способом напишутся остальные уравнения для статора

$$j(3-2s)X_m(\dot I_{31}+\dot I_{22})+j(3-2s)X_m(\dot I_{31}+\dot I_{42})+ \\ +\dot I_{31}[r_1+j(3-2s)X_1]=0. \quad (4)$$

$$j(4s-3)X_m(\dot I_{-31}+\dot I_{-22})+j(4s-3)X_m(\dot I_{-31}+\dot I_{-42})+ \\ +\dot I_{-31}[r_1+j(4s-3)X_1]=0 \quad (5)$$

и т. д.

Заметим, что все параметры и токи приведены к первичной цепи статора.

Образуя теперь суммы э. д. с. и падений напряжений одинаковых частот (s, $2-s$, $3s-2$ и т. д.) в цепи ротора, получим:

$$jsX_m(\dot I_{11}+\dot I_{02})+jsX'_m(\dot I_{-11}+\dot I_{02})+\dot I_{02}(r_2+jsX_2)=0, \quad (2')$$

$$j(2-s)X_m(\dot I_{11}+\dot I_{22})+j(2-s)X_m(\dot I_{31}+\dot I_{22})+ \\ +\dot I_{22}(r_2+j(2-s)X_2)=0 \quad (3')$$

$$j(3s-2)X_m(\dot I_{-11}+\dot I_{-22})+j(3s-2)X_m(\dot I_{-22}+\dot I_{-31})+ \\ +\dot I_{-22}(r_2+j(3s-2)X_2=0 \quad (4')$$

и т. д.

Анализ написанных уравнений показывает, что по ним можно составить многоконтурную эквивалентную схему, уравнения напряжения которой тождественны первым. Эта схема получилась такой же, как и известная схема, выведенная другим способом [Л. 4].

Решение этих алгебраических уравнений даст возможность рассчитать величины и угол сдвига фаз составляющих токов по известным параметрам и скольжению машины. При этом для приближенных расчетов мы должны ограничиться конечным числом составляющих токов. Например, ограничиваясь тремя составляющими тока статора и четырьмя составляющими тока ротора, т. е. полагая $I_{31}=I_{52}=0$ получаем семь уравнений (2)—(4) и (2′)—(5′) с семью неизвестными.

Переходя к анализу электромагнитных процессов в генераторе с однофазными обмотками на статоре и на роторе возбуждаемого не от сети, а от конденсаторов, необходимо также отметить, что периодическое изменение взаимоиндуктивности является главной особенностью этой машины, отличающей ее от реактивного (параметрического) генератора, не имеющего обмотки на роторе и действующего по принципу периодического изменения самоиндукции обмотки статора.

Решение дифференциальных уравнений такого генератора является достаточно трудной и кропотливой задачей. Анализ значительно упрощается, если применить предыдущие результаты многократного разложения пульсирующих полей на поля вращающиеся.

Общий вид уравнений для первичной цепи емкостного генератора получается следующим:

$$j[n-(n-1)s]X_m[\dot I_{n1}+\dot I_{(n\mp1)2}]+ \\ +j[n-(n-1)s]X_m[\dot I_{n1}+\dot I_{(n\pm1)2}]+ \\ +\dot I_{n1}[r_1+j(n-j(n-1)s)X_1]-jX_{cn}\dot I_{n1c}=0, \quad (12)$$

$$\dot I_{n1}=\dot I_{n1c}+\dot I_{r.1c}. \quad (13)$$

Подставляя в них целые числа n, принимающие все нечетные положительные и отрицательные величины, мы получим конкретную систему с неограниченным числом уравнений. Уравнения для цепи ротора здесь те же (2′)—(4′), что и для машины, возбуждаемой от сети.

Анализ уравнений показывает, что для этой машины получается эквивалентная, многоцепочная схема, изображенная на рис. 3, уравнения напряжений которой тождественны уравнениям машины. Число контуров такой схемы определяется числом соответствующих токов статора и ротора. В контурах верхней части схемы замещения протекают составляющие токов статора и ротора, соответствующие исходному прямому полю Φ_1 и всем производным от него полям, а в контурах нижней части схемы замещения — соответствующие исходному обратному полю Φ'_1 и всем производным от него полям. В каждом из $(m-1)$ контуров схемы замещения, число которых ограничено для возможности практических расчетов, имеется переменное активное сопротивление, обратно пропорциональное частоте определенной составляющей тока. Все величины в этой схеме приведены к первичной цепи и к одной и той же частоте. Емкость и нагрузка включены здесь во все контуры составляющих тока статора.

По полученной эквивалентной многоконтурной схеме могут быть изучены как режимы самовозбуждения, так и работа на нагрузку емкостного генератора с периодически изменяющимися параметрами.

Результирующие мгновенные значения токов статора и ротора (формы кривых) определяются суммой мгновенных значений отдельных составляющих:

$$i_1=I_{m1}\sin(\omega t+\varphi_1)+I_{m-1}\sin[(2s-1)\omega t+\varphi_{-1}]+ \\ +I_{m3}\sin[(3s-2)\omega t+\varphi_3]+\ldots, \quad (14)$$

$$i_2=I_{m0}\sin(s\omega t+\varphi_0)+I_{m2}\sin[(2-s)\omega t+\varphi_2]+ \\ +I_{m-2}\sin[(3s-2)\omega t+\varphi_2]+\ldots \quad (15)$$

Поскольку мгновенные токи статора и ротора известны, мы можем определить также напряжения на открытых

фазах статора и ротора, а следовательно, и максимальные перенапряжения, возникающие на этих фазах. Для этого выражения для токов (14) и (15) должны быть подставлены в соответствующие дифференциальные уравнения напряжений (например, [Л. 5].)

Итак, выведенные соотношения полностью определяют токи, моменты вращения и э. д. с. на открытых фазах. С другой стороны, изложенная теория дает возможность производить ясный физический анализ и качественное предопределение сложных закономерностей. Для иллюстрации остановимся на следующих положениях.

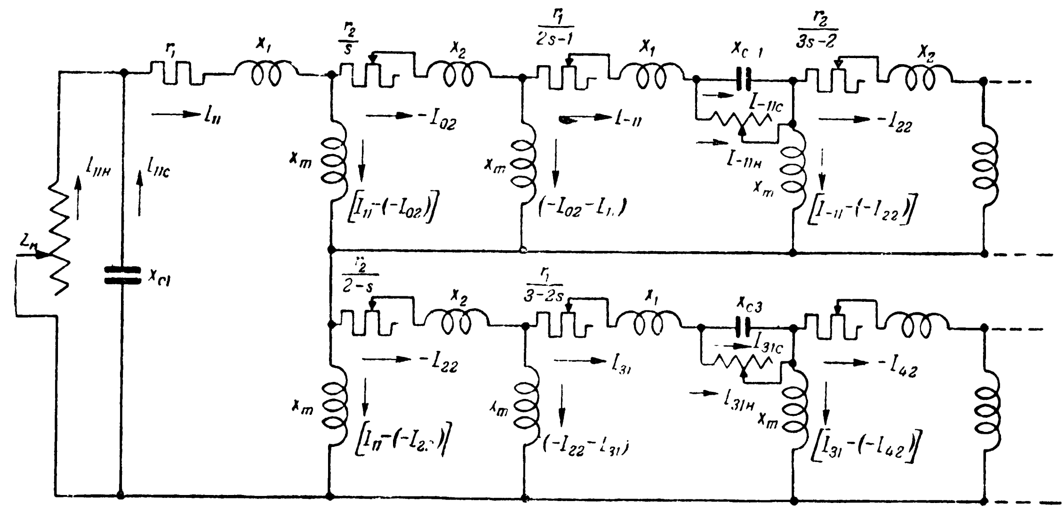


Рис. 3. Эквивалентная схема емкостного асинхронного генератора с однофазными обмотками на статоре и на роторе.

Обоснование существования ряда устойчивых скоростей вращения. Как известно [Л. 2.], эти скорости близки к 1, 1/2, 1/3, 1/4, 1/5 и т д. синхронной скорости. Частоты составляющих токов статора и ротора s, $2s-1$, $3s-2$, $4s-3$, $5s-4$ и т. д. равны нулю соответственно только при скольжениях 0, $^1/_2$, $^2/_3$, $^3/_4$ $^4/_5$ и т. д. (рис. 2). При этих скольжениях точно соответствующих написанным выше скоростям ротора, рассматриваемые составляющие токов проходят через нуль; соответствующие им моменты вращения при указанных скольжениях меняют знаки на обратные. В эквивалентной схеме при скоростях ротора 1, $^1/_2$, $^1/_3$, $^1/_4$ и т. д. размыкаются верхние контуры так как их активные сопротивления $\frac{r_2}{s}$, $\frac{r_1}{2s-1}$ и т. д. становятся бесконечно большими. Указанный ряд устойчивых скоростей практически ограничен небольшим числом членов ввиду малости величин определенных составляющих токов. Так, например, как показали опыты, машины типа МКА, работающие в однофазном режиме почти без нагрузки на валу, имеют шесть — семь устойчивых скоростей вращения.

Колебания э. д. с., токов и мощности при питании двигателя от сети. Результирующие э. д. с. и токи в статоре и в роторе определяются суммой их составляющих изменяющихся с различными частотами.

В первой устойчивой зоне э. д. с. и ток статора, кроме основных колебаний, сложной формы, совершают низкочастотные биения, а ток ротора — низкочастотные колебания, частоты которых пропорциональны скольжению. Объясняется это тем, что при малом скольжении в статоре протекают составляющие с близкими по величине частотами f и $(2f-1)f$, на которые накладываются составляющие с почти трехкратной, пятикратной и тому подобными частотами, а в роторе протекает составляющая с частотой скольжения, а также составляющие с почти двухкратной, четырехкратной и тому подобными частотами. Во второй устойчивой зоне скольжение ротора относительно синхронной скорости изменяется от 0,5 до 0,5 + Δs. Переменные изменяются уже по другому закону. Здесь кривая тока статора содержит составляющие с частотой сети, с почти двойной тройной, четерехкратной и тому подобными частотами, на которые налагается низкочастотное колебание $2s-1=2\Delta s$. Наоборот, в роторе здесь происходят биения тока вследствие наличия составляющих с частотами $3s-2=-0{,}5+3\Delta s$ и $s=0{,}5+\Delta s$.

Таким образом, если в статоре совершаются низкочастотные биения, то в роторе — низкочастотные колебания, и наоборот. Эти вторичные низкочастотные колебания и биения имеют место вблизи скоростей 1, $^1/_2$, $^1/_3$, $^1/_4$, и т. д. вследствие того, что именно в этих зонах, во-первых частоты колебаний s, $2s-1$, $3s-2$, $4s-3$ и т. д. являются по величине незначительными и, во-вторых, в цепях протекают составляющие с близкими по величине частотами 1 и $(2s-1)$ при $s=\Delta s$, s и $3s-2$ при $s=0{,}5+\Delta s$

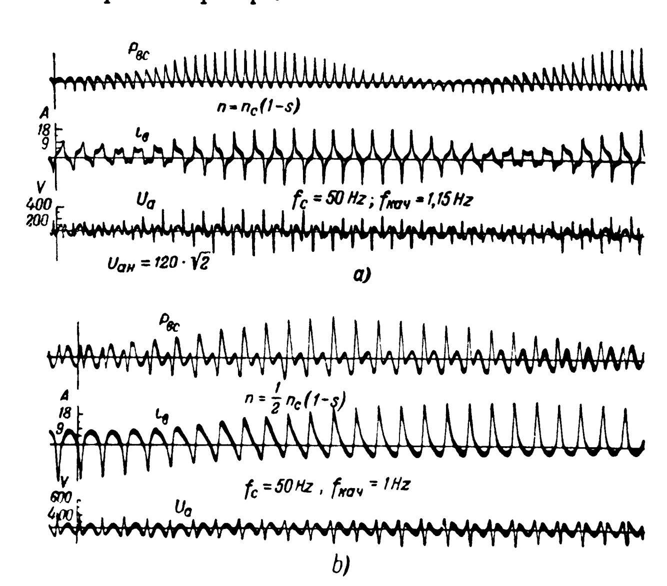
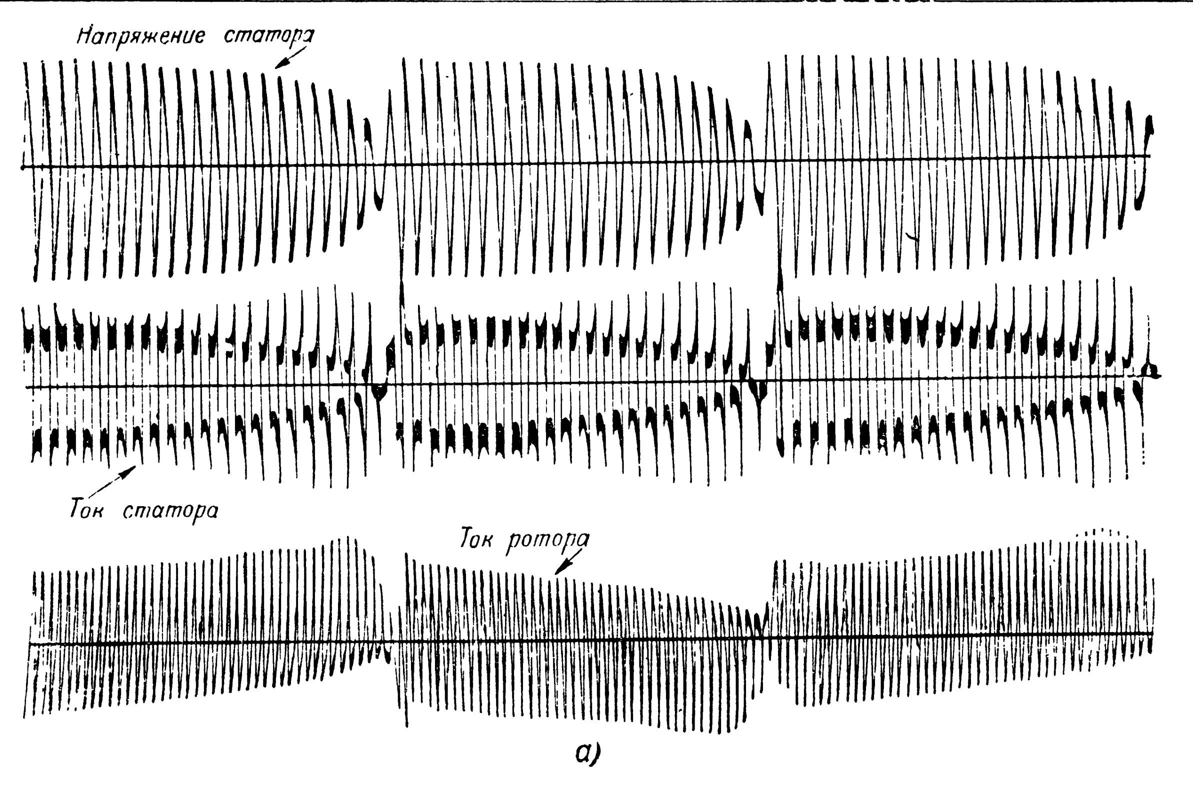


Рис. 4. Мощность, ток и напряжение на открытой фазе статора в первой a и во второй b устойчивых зонах.

и т. д. Только при неподвижном роторе колебания тока статора и ротора имеют синусоидальный характер.

Представленные на рис. 4, a и b осциллограммы токов, мощности и э. д. с. на открытой фазе статора в первой и во второй устойчивых зонах вращения подтверждают высказанные положения.

Закономерность изменения напряжения и токов в автономном емкостном генераторе. Характеристики такой машины до сих пор не изучались. Из рассмотрения изменения частот при $s=-\Delta s$ (рис. 2) очевидно, что и напряжение и ток статора такого генератора кроме основных колебаний, изменяющихся по форме в течение определенного интервала времени, должны совершать низкочастотные биения с частотой, пропорциональной скольжению (которая в свою очередь зависит от величины нагрузки), так как в статоре имеются э. д. с. с близкими частотами. Хотя напряжение и ток статора имеют составляющие с одинаковыми частотами, тем не менее их изменение существенно отличается одно от другого. В основном это вызывается тем, что фаза составляющей напряжения, имеющей почти трехкратную частоту ($3-2\Delta s$), отличается от фазы составляющей тока той же частоты почти на 180°. Что касается тока ротора генератора, то он должен совершать низкочастотные колебания, пропорциональные частоте скольжения. Осциллограммы на рис. 5, a и b ясно иллюстрируют указанные закономерности.



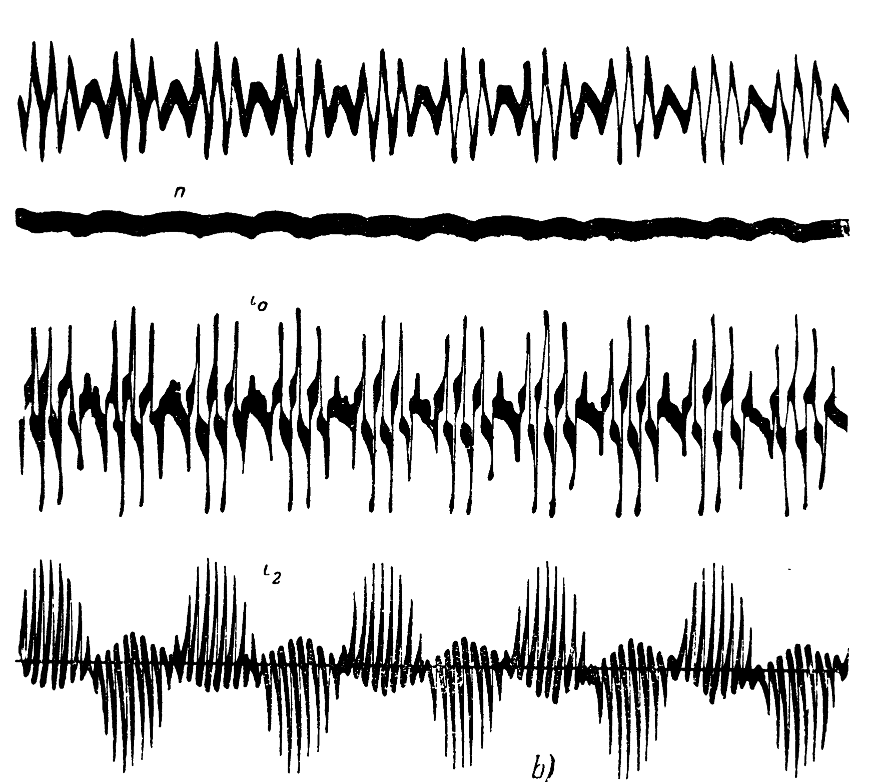


Рис. 5. Напряжение статора, токи статора и ротора при малой *a* и при повышенной нагрузке *b* емкостного генератора с однофазными обмотками.

Автономный емкостный генератор имеет одну устойчивую зону ($s = -\Delta s$), где он может генерировать мощность во внешнюю цепь. Предположение, вытекающее из внешней аналогии, состоящее в том, что, поскольку машина имеет ряд различных устойчивых скоростей вращения при питании ее от источника постоянной частоты, то возможны и „обратные" режимы ее, т. е. возбуждение одинаковых колебаний при различных скоростях емкостного генератора, противоречит основному положению теории, указывающему на определенную зависимость форм кривых токов и э. д. с. от скольжения (рис. 2.). Это согласуется также с результатами экспериментального исследования.

Заключение. Применение теории вращающихся полей к анализу электромеханических процессов в асинхронных машинах с однофазными обмотками на статоре и на роторе показывают, что наряду с возможностями расчета характеристик, такой анализ отличается общностью и физической наглядностью. Основные закономерности сложных процессов сравнительно просто могут быть теоретически предопределены и анализированы.

Литература

1. Д. А. Городский. ВЭП, № 6, 1942.
2. P. Weidig. Die Wechselstrom Inductionsmaschine mit einachsiger sekundärwicklung. Dissertation, 1912.
3. C. Makmillan. Karter. El. Eng, v. 60. № 8, 1941.
4. W. Lyon. AIEE Trans. v. 59, 1940.
5. П. А. Свириденко. Известия ОТН Академии наук СССР, № 3, 1944.

✧ ✧ ✧

Внезапное короткое замыкание в генераторах постоянного тока с тремя обмотками возбуждения

Кандидат техн. наук, доц. ***Л. И. ПОЛТАВА***

Криворожский горнорудный институт

Генераторы с тремя обмотками возбуждения, из которых одна противокомпаундная, нашли широкое применение в специальной схеме Леонарда, главным образом, для привода экскаваторов, вспомогательных механизмов тяжелых обжимных станов и для других приводов, работающих с резко переменной нагрузкой и требующих строго ограниченного предельного значения момента. Кроме того, генераторы постоянного тока с противокомпаундной обмоткой находят применение и в других специальных схемах. Схема трехобмоточного генератора представлена на рис. 1.

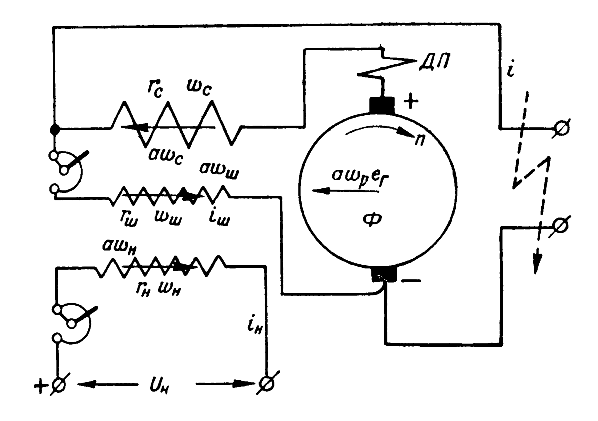


Рис. 1. Схема генератора с тремя обмотками.

aw_c — сериесные ампервитки; $aw_н$ — независимые ампервитки; $aw_ш$ — шунтовые ампервитки; aw_p — размагничивающие ампервитки реакции якоря.

Установившийся ток короткого замыкания таких генераторов может быть ограничен в любых пределах.

В работе рассматривается режим внезапного короткого замыкания. Этот аварийный режим может иметь место: при коротком замыкании на зажимах генератора или двигателя (в схемах Леонарда), замыкании обоих полюсов через корпус, в соединительных кабелях при замыкании их непосредственно между собой или через землю.

Изучение этого режима представляет практический и теоретический интерес. Вопрос этот, насколько известно автору, не изучен ни экспериментально, ни теоретически.

В работе приняты следующие допущения: 1) кривая намагничивания в переходном процессе — прямая линия; 2) влияние вихревых токов не учитывается; 3) между обмотками возбуждения существует полная магнитная связь; 4) скорость генератора — $n = \text{const}$; 5) размагничивающее влияние реакции якоря учитывается увеличением ампервитков противокомпаундной обмотки.

Уравнения переходного процесса и максимум тока. В соответствии с принятыми допущениями для схемы генератора рис. 1 можно написать следующие четыре основных уравнения:

$$e_г = k_1\Phi = iR_a + L_я \frac{di}{dt} - w_c \frac{d\Phi}{dt}, \tag{1}$$

$$U_н = i_н R_н + \sigma w_н \frac{d\Phi}{dt}, \tag{2}$$

$$0 = i_ш R_ш + \sigma w_ш \frac{d\Phi}{dt}, \tag{3}$$

$$\Phi = k_2 AW = k_2 \left[i_н w_н + i_ш w_ш - (i w_c + a w_p)\right], \tag{4}$$

где кроме указанных на рис. 1 обозначений R_a, $R_н$, $R_ш$ полное сопротивление цепей, соответственно цепей якоря, независимой и шунтовой обмоток; $\sigma > 1$ — коэффициент рассеяния; $L_я$ — коэффициент самоиндукции якоря, включая добавочные полюса и коэффициент самоиндукции сериесной обмотки от потоков рассеяния; k_1, k_2 — коэффициенты пропорциональности $k_1 = \frac{E_0}{\Phi_0}$ и $k_2 = \frac{\Phi_0}{AW_0}$; E_0, Φ_0, AW_0 — начальные значения э. д. с., потока и результирующих ампервитков; $iw_c + aw_p$ в дальнейшем заменяется как iw'_c, где w'_c — приведенные сериесные витки с учетом реакции якоря.

В рассматриваемом процессе самой характерной величиной является максимум тока, который зависит, с одной стороны, от скорости затухания потока (э. д. с.) и, с другой стороны, вследствие индуктивности от скорости нарастания тока в якоре. Так как оба эти процесса взаимно связаны, необходимо решить совместно уравнения (1), (2), (3) и (4) относительно тока. После преобразований получим:

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{1}{T_я}\left[\frac{T_н + T_ш + T_a}{T_н + T_ш}\right]\frac{di}{dt} + \frac{1}{T_я}\left[\frac{1+\varepsilon_T}{T_н + T_ш}\right] i = \frac{I_{ки}}{T_я [T_н + T_ш]}\frac{aw}{AW_0}, \tag{5}$$

где $T_я = \frac{L_я}{R_a}$; $T_a = T_я + \frac{w_c^2}{R_a}\frac{\Phi_0}{AW_0}$; $T_н = \frac{w_н^2}{R_н}\sigma\frac{\Phi_0}{AW_0}$ и

$T_ш = \frac{W^2_ш \sigma}{R_ш}\frac{\Phi_0}{AW_0}$ — электромагнитные постоянные: якоря, цепи якоря, цепи шунтовой и независимой обмоток;

$I_{ки} = \frac{E_0}{R_a}$ — идеальный ток короткого замыкания;

$\varepsilon_T = \frac{I_{ки} w'_c}{AW_0}$ — теоретический коэффициент размагничивания машины при внезапном коротком замыкании.

Форма решения уравнения (5) зависит от корней характеристического уравнения, которые могут быть найдены из уравнения

$$\alpha^2 + \beta\alpha + \gamma = 0, \tag{6}$$

откуда

$$\alpha_{1,2} = -\frac{\beta}{2}\left[1 \mp \sqrt{1 - \frac{4\gamma}{\beta^2}}\right]. \tag{7}$$

Анализ этого уравнения показывает, что для трехобмоточных генераторов вследствие сильной противокомпаундной обмотки $\gamma > \left(\frac{\beta}{2}\right)^2$ и поэтому корни всегда будут комплексно-сопряженные и в соответствии с этим, переходный процесс должен быть колебательно-затухающим. Рассмотрение параметров показывает, что с ростом мощности машины сопротивление якоря уменьшается и колебания будут более выражены, так как при этом сильно возрастает коэффициент размагничивания машины ε_T.

Раскрывая значения γ и β под корнем в уравнении (7), получим с достаточной точностью, что комплексные корни будут при

$$T_я > \frac{T_н + T_ш}{4\varepsilon_Г}.$$

В соответствии с изложенным

$$\alpha_{1,2} = \lambda \pm jz \qquad (7а)$$

где

$$\lambda = -\frac{\beta}{2} \quad и \quad z = \frac{\beta}{2}\sqrt{\frac{4\gamma}{\beta^2} - 1}.$$

Так как при установившемся режиме ток будет $I_к$ и поток $\Phi_к$, то полное решение уравнения (5) будет:

$$i = C\epsilon^{\lambda t} \sin\left[zt + \varphi_2\right] + I_к. \qquad (8)$$

Из начальных условий — при $t = 0$, $i = I_0$ и $U = 0$ определим постоянные интегрирования, которые с некоторым упрощением будут:

$$\operatorname{tg} \varphi_2 \approx -\frac{T_я z(I_к - I_0)}{I_{ки} - I_0} \quad и \quad C \approx \frac{I_{ки} - I_0}{T_я z}. \qquad (9)$$

Дифференцируя (8) и приравнивая нулю, можно найти время, в течение которого ток достигает максимума:

$$t_{max} = \frac{\varphi_1^{\circ} - \varphi_2^{\circ}}{z}\left|\frac{\pi}{180}\right| \sec. \qquad (10)$$

и соответственно максимум тока

$$I_{max} = Ce^{\lambda t_{max}} \sin \varphi_1 + I_к, \qquad (11)$$

где

$$\operatorname{tg} \varphi_1 \approx -\frac{z}{\lambda}.$$

Расчеты по этой формуле дают вполне удовлетворительные результаты. При выводе в формулу вошли начальные статические параметры обмоток. Однако, поскольку максимум тока имеет место в начале процесса, будет более точным подставлять начальные динамические параметры.

Для проверки расчетов была снята осциллограмма короткого замыкания на трехобмоточном генераторе, которая приведена на рис. 2[1]. Данные генератора:

$$P_N = 4{,}2\,\text{kW},\ U_N = 220\,\text{V},\ I_N = 22{,}4\,\text{A},$$

$$R_a = 0{,}98\,\Omega,\ I_к = 39\,\text{A}\ \frac{aW_p}{AW_N} = 0{,}08.$$

Размагничивающие ампервитки реакции якоря aw_p определены по статической внешней характеристике.

Короткое замыкание было произведено при холостом ходе и $U_0 = 220$ V. Результаты сравнения опытных и расчетных данных следующие:

1. Расчет по начальным статическим параметрам

$$I_{max} = 112\,\text{A},\quad t_{max} = 0{,}043\,\text{sec}.$$

2. Расчет по начальным динамическим параметрам

$$I_{max} = 105{,}5\,\text{A},\quad t_{max} = 0{,}03\,\text{sec}.$$

3. Из осциллограммы

$$I_{max} = 100\,\text{A},\quad t_{max} = 0{,}027\,\text{sec}.$$

Затухание переходного процесса Затухание всего процесса зависит от затухания потока, которое обуславливается, главным образом, параметрами обмоток возбуждения и степенью противокомпаундирования. Индуктивность якоря, которая определяет максимум тока и фактический коэффициент размагничивания машины, в период затухания не имеет существенного значения.

Вместе с тем, опыт показывает, особенно у малых машин с большим R_a, что хотя в кривой тока и имеются составляющие колебательного процесса, но они небольшие и быстро затухают. Очевидно здесь сказывается демпфирующее действие токов Фуко и нелинейность системы.

Поскольку все факторы этого сложного процесса математически не могут быть учтены, то должны быть выделены лишь те, которые, главным образом, определяют процесс. Исходя из этого, индуктивностью якоря, как второстепенным параметром для рассматриваемой части процесса, можно пренебречь. Зная максимум тока и приняв, что он имеет место при $t = 0$, решим уравнения (1), (2), (3) и (4) относительно Φ. После преобразований получим:

$$\frac{d\Phi}{dt} + \left[\frac{1 + \varepsilon_б}{T_н + T_ш + T_c\frac{r_c}{R_a}}\right]\Phi = \frac{\Phi_0}{\left(T_н + T_ш + T_c\frac{r_c}{R_a}\right)}\frac{aw_н}{AW_0}, \qquad (12)$$

где $\varepsilon_g = \frac{I_{max}w'_c}{AW_0} = \frac{I_{max}}{I_{ки}}\varepsilon_T$ — действительный коэффициент размагничивания машины.

Окончательное решение этого уравнения будет:

$$\Phi = \left[\Phi_0 - \Phi_к\right]e^{-\frac{t}{T_в}} + \Phi_к. \qquad (13)$$

Решая аналогично для тока в якоре, получим:

$$i = \left[I_{max} - I_к\right]e^{-\frac{t}{T_в}} + I_к. \qquad (14)$$

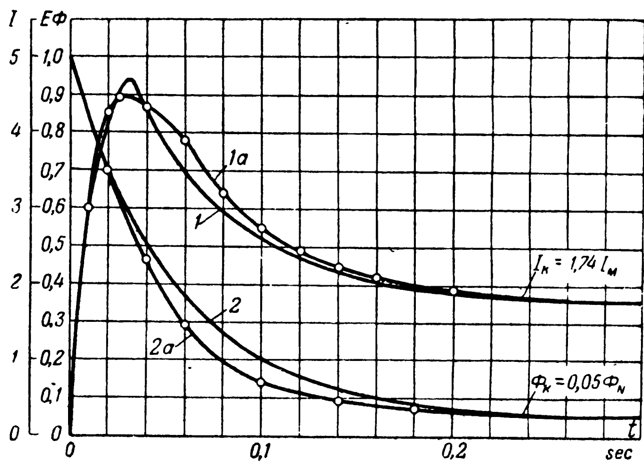


Рис 2. Ток и поток (э. д. с.) в относительных единицах при внезапном коротком замыкании трехобмоточного генератора $P_N = 4{,}2$ kW, $U_N = 220$ V поток — $\frac{\Phi}{\Phi_N} = (1-0{,}05)\,e^{-17{,}4t} + 0{,}05$, ток — $\frac{i}{I_N} = (4{,}7-1{,}74)\,e^{-17{,}4t} + 1{,}74$.

[1] В экспериментальной проверке, которая произведена в лаборатории электропривода ЛПИ, принимал участие А. Я. Шаптала.

В этих формулах $T_в = \dfrac{T_н + T_ш + T_c \dfrac{r_c}{R_a}}{1+\varepsilon_д}$ — эквивалентная электромагнитная постоянная, которая определяет затухание процесса.

На рис. 2 построены расчетные кривые тока и потока (э. д. с.) в относительных единицах. Для тока за $t = 0$ принято время, соответствующее I_{max}. Для сравнения на том же рисунке приведены опытные кривые, взятые из осциллограммы (кривые 1,*а* и 2,*а*).

Выводы. Внезапное короткое замыкание представляет собой чисто электромагнитный переходный процесс, протекание которого обуславливается параметрами машины и степенью ее противокомпаундирования.

Предложенные формулы для расчета максимума тока и переходного процесса дают вполне удовлетворительные результаты при сравнении с опытом.

Максимум тока короткого замыкания, хотя и меньше, чем в обычных генераторах постоянного тока, но значительно превышает статическое значение тока короткого замыкания.



Определение времени разбега асинхронного короткозамкнутого электродвигателя с произвольной нагрузкой на валу

Кандидат техн. наук А. А. КЛИМОВ

Москва

Сущность метода сводится к графическому интегрированию равенства

$$t_p = \int\limits_0^n \frac{(GD^2)_{пр}}{375(M_{дв} - M_c')}\, dn,$$

где t_p — искомое время разбега системы электродвигатель — рабочая машина;

$(GD^2)_{пр}$ — маховой момент системы, приведенный к оборотам вала электродвигателя;

$M_{дв}$ — крутящий момент электродвигателя;

M'_c — момент сопротивления рабочей машины, приведенный к оборотам вала электродвигателя;

n — число оборотов электродвигателя.

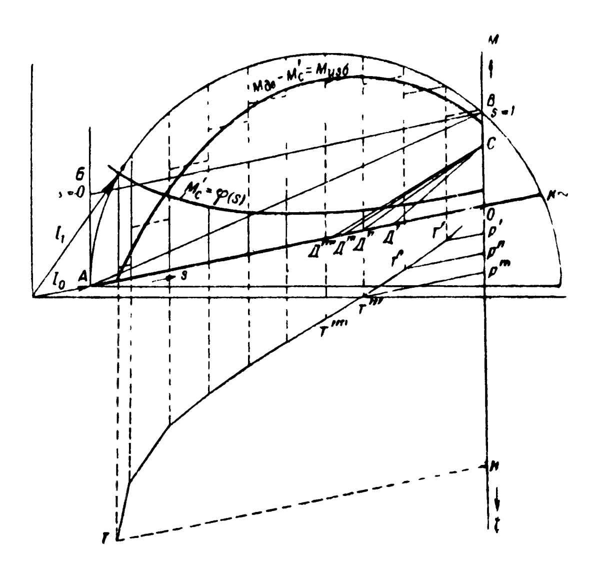
При пуске $M_{дв}$ и M' — переменные, а ускорение изменяется по сложному закону, поэтому аналитическое интегрирование указанного равенства представляет трудную задачу и нередко совершенно неразрешимую. В этом случае более удобным оказывается графическое интегрирование.

Предлагаемый способ интегрирования предусматривает использование круговой диаграммы электродвигателя, которая строится по опытным или каталожным данным и которая обычно уже имеется в наличии.

Проведем параллельно линии моментов *АО* (рисунок), линию скольжения *БВ* таким образом, чтобы она пересекала линию полезной мощности *АВ* в точке *В*. Так как отрезок *БВ* параллелен и равен *АО*, то на линии моментов *АО* легко нанести числовые значения скольжений, при соответствующих крутящих моментах на валу электродвигателя $M_{дв}$. При этом точка *А* будет соответствовать скольжению $s = 0$ и $M_{дв} = 0$, а точка *О* — скольжению $s = 1$ и $M_{дв} = M_{пуск}$.

Откладывая в масштабе моментов вверх от линии *АО* значения приведенных моментов сопротивления рабочей машины, при соответствующих скольжениях, получим кривую $M'_c = \varphi(s)$. Разности отрезков, выражающих моменты электродвигателя и приведенные моменты рабочей машины, образуют точки кривой избыточного, ускоряющего момента:

$$M_{изб} = M_{дв} - M'_c.$$



Для определения времени разбега t_p заменим кривую эквивалентной ломаной, для чего используем известную пропорцию

$$\frac{M_{дв} - M_c'}{j} = \frac{d\omega}{dt} \approx \frac{\Delta\omega}{\Delta t}.$$

В связи с тем, что по AO отложено скольжение, а

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \text{ и } s = \frac{n_0 - n}{n_0},$$

где n — текущее значение скорости вращения электродвигателя в оборотах в минуту;
n_0 — синхронная скорость;
поэтому

$$d\omega = -\frac{\pi n_0}{30} ds = -\operatorname{const} ds.$$

Подставляя в предыдущее соотношение, получим:

$$\frac{M_{дв} - M_c'}{\operatorname{const} j} = -\frac{ds}{dt} \approx -\frac{\Delta s}{\Delta t}.$$

Откладывая const j вверх от точки O по линии OM, в масштабе

$$m_j = \frac{m_M \cdot m_t}{m_s},$$

где m_M, m_t, m_s — масштабы для M, t и s, получим точку C.

По линии моментов AO от точки O отложим для каждой ступени кривой избыточного момента значения его отрезков. Полученные точки $Д'$, $Д''$, $Д'''$ и т. д. соединим с точкой C.

Если теперь из точки O провести параллельно лучу $СД'$ линию до пересечения ее с пунктирным продолжением соответствующей первой ступени избыточного момента, то получим отрезок OT'; для последующей второй ступени — отрезок $T'T''$; для третьей — $T''T'''$ и т. д.

Проведя из точек T', T'', T''' ... T параллельно AO линии до пересечения их с Ot, получим отрезки OP', $P'P''$, $P''P'''$ и т. д., которые в масштабе времени представят время разбега Δt_1, Δt_2, Δt_3 .. Δt_n на соответствующих ступенях избыточного момента.

Действительно, например, для первой ступени из подобия треугольников $Д'CO$ и $T'OP'$ следует:

$$\frac{OД'}{OC} = \frac{P'T'}{OP'}.$$

Но в масштабах $OC = \operatorname{const} j$, $OД' = M_{изб}$, $P'T' = -\Delta s_1$, тогда

$$\frac{M_{изб1}}{\operatorname{const} j} = -\frac{\Delta s_1}{OP'}$$

и, следовательно, при отмеченных масштабах $OP' = \Delta t_1$; нетрудно видеть, что $P'P'' = \Delta t_2$, $P''P''' = \Delta t_3$ и т. д.

Таким образом, кривая $OT'T''$ ... T''' представляет $s = f(t)$. По достижении $M_{изб} = 0$ повышение скорости прекращается и разбег закончен. Отрезок OH в должном масштабе определит искомое время разбега системы.



Скорость движения короткой электрической дуги

Кандидат техн. наук Н. А. БАБАКОВ

Харьковский электротехнический институт

В контактных и дугогасящих устройствах низковольтных выключающих аппаратов часто приходится иметь дело с движением электрической дуги в узких щелях между двумя параллельными электродами. Опыты, произведенные О. Б. Броном, показали, что за время нахождения дуги между контактами они расходятся на 2—3 mm при выключении и на доли миллиметра при включении [Л. 1]. Износ деталей выключающих аппаратов, по которым могут двигаться опорные точки дуги (искрогасительная решетка, контакты, рога), определяется, главным образом, скоростью движения электрической дуги.

Проведенные работы восполнили недостаток в опытных данных и позволили установить изменение скорости движения дуги при расстоянии между электродами менее 1,5 mm и определить максимальную величину скорости движения дуги в различных условиях. В качестве метода исследования использована многократная фотосъемка в сочетании с осциллографированием. Этим методом определялась скорость движения электрической дуги в узкой щели на расстояниях между медными электродами a от 3 mm до 0,1 mm. Ток, возникающий между электродами дуги, составляет $I = 100$ A и 400 A. Напряженность магнитного поля [1], воздействующего на дугу, $H = 100 \div 1\,000$ Oe. При этом была получена скорость движения дуги от нескольких метров до 100 m/sec. Для каждого значения a, I и H опыт повторялся не менее шести раз. За истинное значение скорости движения дуги принималось среднее значение.

На основании опытных данных построены кривые рис. 1, 2. Они выражают зависимость скорости движения дуги v_n в узких поперечных щелях от расстояния a между электродами

[1] Магнитное поле от тока в электродах учитывалось.

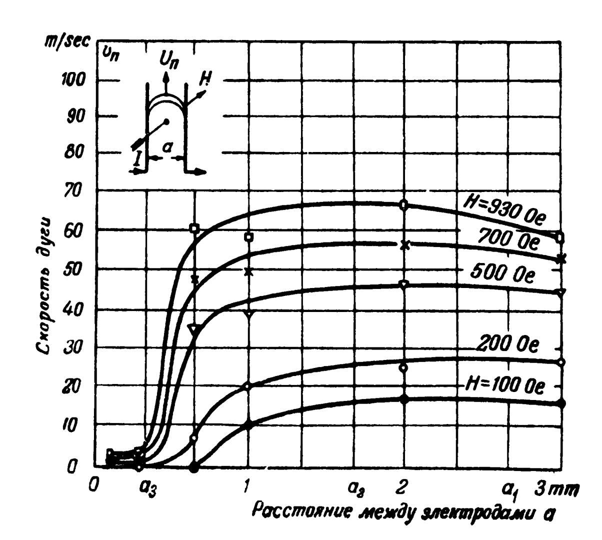




Рис. 1. Зависимость скорости движения дуги от расстояния между электродами при $I = 100$ А.

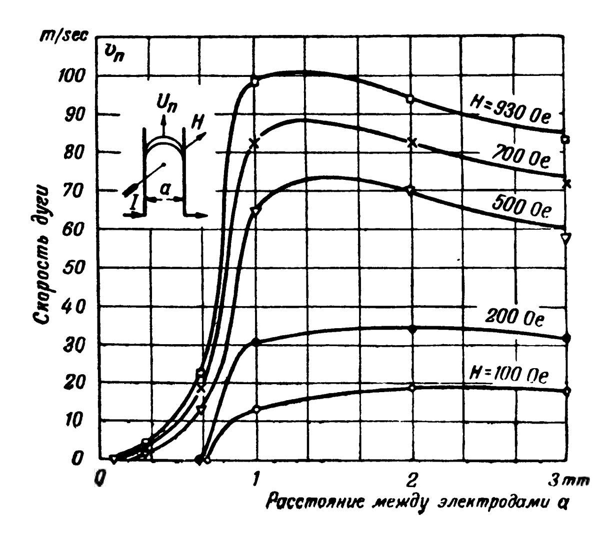


Рис. 2. Зависимость скорости движения дуги от расстояния между электродами при $I = 400$ А.

и относятся к различным токам и напряженностям магнитного поля.

Весь диапазон исследованных расстояний может быть разбит на три области: область I лежит в интервале между значениями a, равными a_1 и a_2; область II — между a_2 и a_3; область III — между a_3 и 0. Для каждой области существует свой закон изменения скорости в зависимости от уменьшения расстояния. В соответствии с полученными данными рост тока вызывает перемещение максимума кривых скорости (рис. 1, 2) в сторону меньших расстояний между электродами.

Рассматривая движение электрической дуги в интервале между a_1 и a_2, принимаем во внимание только явления, происходящие в столбе дуги, не учитывая того, что происходит у ее опорных точек.

При рассмотрении дуги в области II необходимо учитывать явления, происходящие у электродов, так как в этой области, несмотря на малую вероятность расщепления дуги на параллельные волокна и сворачивания дуги в спираль, скорость дуги уменьшается с уменьшением расстояния a, что указывает на наличие каких-то иных факторов, обуславливающих закон изменения скорости в этой области. Во-первых, электрическую дугу можно рассматривать как газовый столбик, увлекающий при своем движении часть находящегося вокруг него воздуха. Уменьшение ширины щели между электродами, начиная с некоторого значения a, приводит к сильному увеличению сопротивления движению газовой струи. Это снижает скорость дуги в узких щелях. Во-вторых, снижение скорости дуги в области II связано, повидимому, с особенностями перемещения самих опорных точек дуги, обуславливающих затруднительный переход катодного пятна по поверхности металла. В длинных дугах это явление часто происходит вследствие перекрытия соседних к катоду зон.

При коротких дугах перемещение катодного пятна более затруднительно вследствие невозможности легкого выгибания дуги. Подтверждением того, что скорость дуги определяется перемещением катодного пятна, служит и то, что скорость движения зависит от материала электродов. Кроме того, на скорости дуги сказывается характер процесса образования окиси на поверхности электродов. Все это указывает на то, что уменьшение скорости движения дуги объясняется не только увеличением аэродинамического сопротивления, но и эффектом затруднительного перехода катодного пятна.

При очень малых расстояниях между электродами возможны следующие явления, замеченные Ю. В. Буткевичем. Дуга под действием магнитного поля смещается или выгибается, и тогда вследствие близости опорных точек может снова возникнуть пробой промежутка. Эти пробои отразятся на средней скорости перемещения дуги, причем, чем меньше расстояние между электродами, тем вероятнее повторный пробой и тем меньше средняя скорость дуги. Для перемещения опорных точек дуги нужно воздействие на дугу некоторых электродинамических сил. Можно говорить в таком случае о сопротивлении опорных точек дуги их перемещению. На дугу, находящуюся в узкой щели между параллельными электродами, действуют следующие силы: 1) сила взаимодействия тока в дуге с окружающим ее магнитным полем

$$K = HIa; \quad (1)$$

2) сила сопротивления воздуха движению газового столба дуги

$$K_1 = c_1 l v_n, \quad (2)$$

где c_1 — коэффициент пропорциональности;
l — длина дуги;
v_n — скорость дуги.

Таким образом, эта сила пропорциональна длине дуги и квадрату ее скорости; 3) K_2 — сила трения о стенки узкой щели потока газов, увлекаемого дугой. Выражая зависимость сопротив-

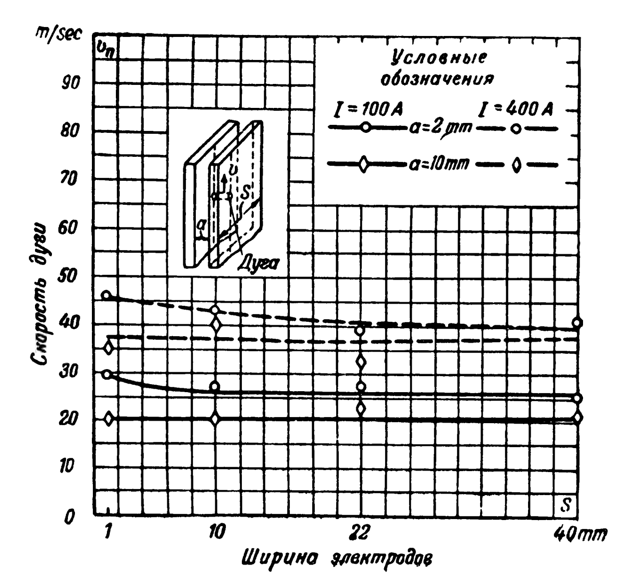


Рис. 3. Зависимость скорости движения дуги от ширины электродов при $H = 200$ Ое.

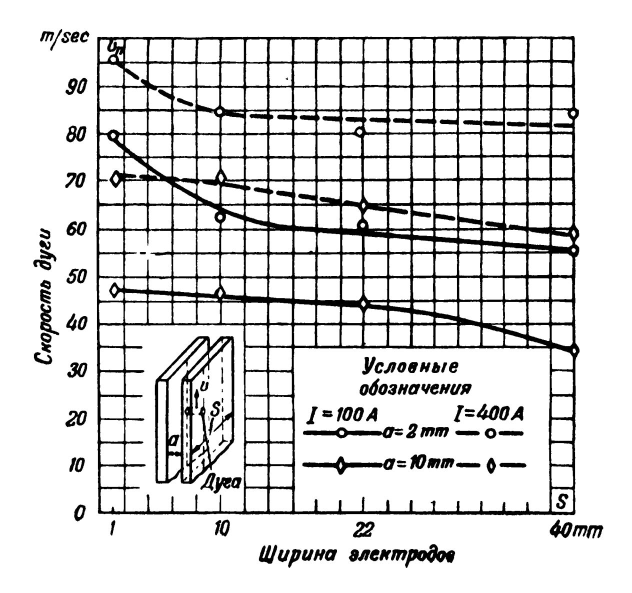


Рис. 4. Зависимость скорости движения дуги от ширины электродов при $H = 800$ Ое.

ления движению газовой струи от ширины щели a, найдем:

$$K_2 = \frac{c_2 v^2_n}{a^m}, \tag{3}$$

где c_2 — коэффициент пропорциональности;
m — некоторое положительное число (2, 3 и даже 4).

Сложность явлений, связанных с движением газовой струи в узких щелях при сильно меняющейся температуре около дуги, не позволяет в настоящее время найти точное выражение для силы K_2. Несомненно только то, что она должна возрастать с уменьшением a и поэтому снижать скорость дуги в узких щелях.

Полагаем, что силы K_3, необходимые для перемещения кратеров дуги, зависят от a. Чем меньше расстояние a, тем больше K_3. Однако, сложность явлений, происходящих у опорных точек дуги, не позволяет пока найти аналитическое выражение для сил K_3. Несомненно, что при малых значениях a эти силы должны сильно влиять на скорость движения дуги, уменьшая ее величину. Возрастанием сил K_2 и K_3 при уменьшении расстояния a между электродами обусловлено снижение скорости в области *II*.

Для выяснения роли силы трения K_2 были предприняты опыты по определению скорости движения электрической дуги в узкой щели между параллельными медными электродами различной ширины (1, 10, 22 и 40 mm).

Рассматривая дугу, движущуюся в узкой щели между параллельными электродами, полагаем, что со скоростью v_n движется ствол дуги. Слои окружающего дугу газа движутся с меньшими скоростями, которые тем меньше, чем дальше слой газа отстоит от дуги. Трение этих слоев газа о стенки щели снижает скорость движения дуги Если же уменьшить ширину электродов, то часть увлекаемых дугой газов окажется вне щели, не будет испытывать трения об электроды, и скорость дуги возрастет.

По опытным данным были построены кривые, приведенные на рис. 3 и 4.

При 100 А и напряженности магнитного поля 200 Ое скорость дуги практически не зависит от ширины электродов при любом расстоянии между электродами. Но при напряженности 800 Ое и при расстоянии между электродами 2 mm скорость уже зависит от ширины электродов, причем эта зависимость обнаруживается при уменьшении ширины от 10 до 1 mm. При 400 А скорость дуги также зависит от ширины электродов при напряженности магнитного поля в 800 Ое. Чем больше скорость, тем сильнее должна сказываться ширина электродов. Эти опыты подтверждают зависимость скорости движения дуги от величины силы трения потока газов о стенки электродов.

В соответствии с кривыми рис. 1—2 в области II наблюдается сильное уменьшение скорости как при I=100 А, так и при I=400 А. Из этого можно заключить, что трение увлекаемого воздуха о стенки не является основной причиной уменьшения скорости. Уменьшение скорости вызывается, главным образом, физическими процессами, обуславливающими перемещение опорных точек дуги. В области *III* скорость дуги по величине чрезвычайно невелика и мало зависит от расстояния. Для выяснения причин, вызывающих изменение скорости в этой области, был проведен следующий опыт. В нижней части двух параллельных, близко стоящих шин помещалась плавкая вставка. После перегорания этой плавкой вставки обе шины оказывались соединенными светящимся столбиком, который под действием электродинамических сил двигался кверху. Ток включался раньше, чем этот светящийся столбик доходил до верхнего края шин. После этого обе шины оказывались соединенными между собой металлическим перешейком в том месте, где останавливался светящийся столбик. Это позволило считать, что в очень узких щелях происходит движение металлического перешейка, а не дуги. Этот металлический перешеек всегда имеет тот же состав, что и материал шин. При медленном движении дуги происходит оплавление электродов и образование капелек расплавленного металла. Если расстояние между электродами мало, то возможно перемыкание капелек, образованных на двух электродах. Тогда между электродами появляется перешеек из расплавленного металла. Следовательно, характер изменения скорости в области *III* обусловлен законами движения расплавленного металлического перешейка. Малая скорость перешейка может быть объяснена повышением сопротивления из-за поверхностного натяжения капли. Выразить это сопротивление аналитически представляет значительные математические трудности.

Аппаратура. При исследовании движения электрической дуги в аппаратной лаборатории Харьковского электротехнического института применялся аппарат для ускоренной кино-фотосъемки системы Брона-Александрова [Л. 1]. Аппарат имеет две фотографические камеры, каждая из них разделена перегородками на 12 приблизительно равных частей. В переднюю стенку перед каждым отделением камеры вставлены объективы (всего 24 объектива). Перед объективами помещен тонкий дюралюминиевый диск, в котором сделано 24 отверстия, расположенные на разных расстояниях от центра и сдвинутые, кроме того, друг относительно друга на некоторый угол. Диск приводится во вращение электродвигателем постоянного тока. В специальных дисках, обеспечивающих получение

большой скорости съемки, 24 отверстия расположены на 1/4 или 1/8 части всей поверхности диска.

При вращении диска объективы открываются. Мимо каждого объектива может пройти только одно из отверстий. Число оборотов диска должно быть таково, чтобы время открытия всех 24 отверстий примерно равнялось времени горения дуги. При таком условии весь процесс горения дуги окажется разбитым на 24 равных периода.

Аппарат такой конструкции позволяет делать до 10 000 снимков в секунду.

При исследовании движения дуги впервые был применен аппарат с автоматическим затвором и двойным диском, который был сконструирован по предложению О. Б. Брона. Эти усовершенствования расширили область применения аппарата: так, например, аппарат может теперь с успехом применяться при изучении периодических процессов (устойчивое горение дуги переменного тока, повторные зажигания дуги постоянного тока, переменное движение дуги и т. д.), и позволили регулировать время экспозиции, что необходимо при фотографировании очень ярких объектов (к ним относится и электрическая дуга).

Затвор аппарата устроен следующим образом. Поверх пластинки, покрывающей объектив аппарата, помещается вторая тонкая латунная пластинка (рис. 5), в которой сделано столько продолговатых отверстий, сколько отверстий в первой пластинке. Вначале латунная пластинка закрывает отверстия в диафрагме объективов. При этом пружина *3*, связанная с пластиной *1*, натянута. Защелка *4* удерживает пластинку *1* в этом положении до тех пор, пока катушка электромагнита *5* не будет включена на напряжение. Когда это произойдет, якорь электромагнита *5* воздействует на защелку *4* и она освобождает пластинку *1*. Под действием пружины *3* пластинка перемещается на 2 mm. При этом произойдет открытие отверстий в диафрагме объективов. В таком положении пластинка удерживается защелкой *6*, связанной с электромагнитом *7*, до тех пор, пока этот электромагнит не будет включен на напряжение.

При включении электромагнита *7* пластинка *1* вновь передвигается на 2 mm и закрывает отверстия в диафрагме. Катушки электромагнитов *5* и *7* связаны с контактными кольцами *2*, насаженными на вал электродвигателя. Благодаря этому момент открытия и момент закрытия отверстий в диафрагме строго связаны с положением диска, сидящего на валу электродвигателя. При пользовании затвором применялся специальный диск, в котором все 24 отверстия расположены на 1/16 части окружности. За время, в течение которого затвор открыт, все отверстия успевают пройти один раз мимо объективов. На фотопластинках получится 24 снимка. Пользуясь затвором, можно получить снимки через 1/10 000 sec. Синхронизация работы затвора с фотографируемым процессом осуществляется при помощи осциллографа и отметчика оборотов.

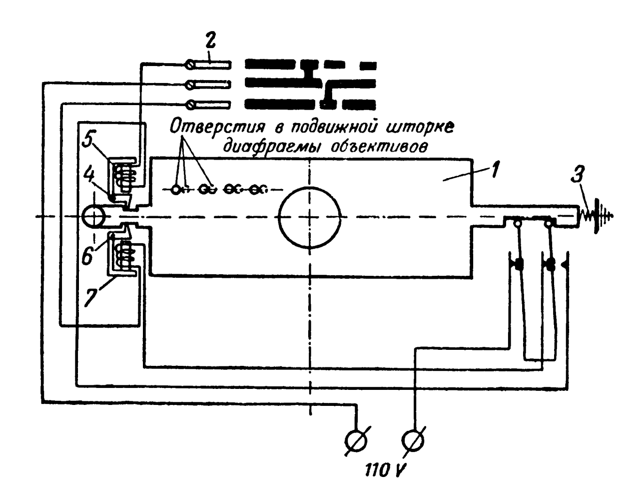


Рис. 5. Затвор аппарата для ускоренной кино-фотосъемки движения электрической дуги.

Литература

1. О. Б. Брон. Движение электрической дуги в магнитном поле. Энергоиздат, 1944.



Осуществление матричных схем с усилителями и решение при их помощи систем дифференциальных уравнений

Кандидат техн. наук Г. Л. ПОЛИСАР и кандидат техн. наук Н. В. КОРОЛЬКОВ

Энергетический институт им. Кржижановского Академии наук СССР

Значительное число технических задач, в частности исследование динамических процессов в различного рода машинах, автоматических устройствах и т. п., сводится к решению систем дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами.

На основе предложенных Л. И. Гутенмахером матричных схем и проведенных теоретических и экспериментальных исследований [Л. 1—6] создано устройство для решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Принципиальная схема устройства приведена на рис. 1. Изменение напряжений на входах усилителей во времени в этой схеме приближенно описывается системой дифференциальных уравнений вида

$$\sum_{k=1}^{n} (a_{ik}G + b_{ik}Cp)\,u_k + \varphi_i(t) = 0, \quad (i = 1, 2 \ldots n)$$

где G — активные проводимости связей;

C — емкость связей;

$\varphi_i(t)$ — произвольная функция времени;

$p = \frac{d}{dt}$.

Увеличением числа усилителей и связей, участвующих в схеме, можно создать устройство для решения систем из большего числа дифференциальных уравнений. Сейчас заканчивается

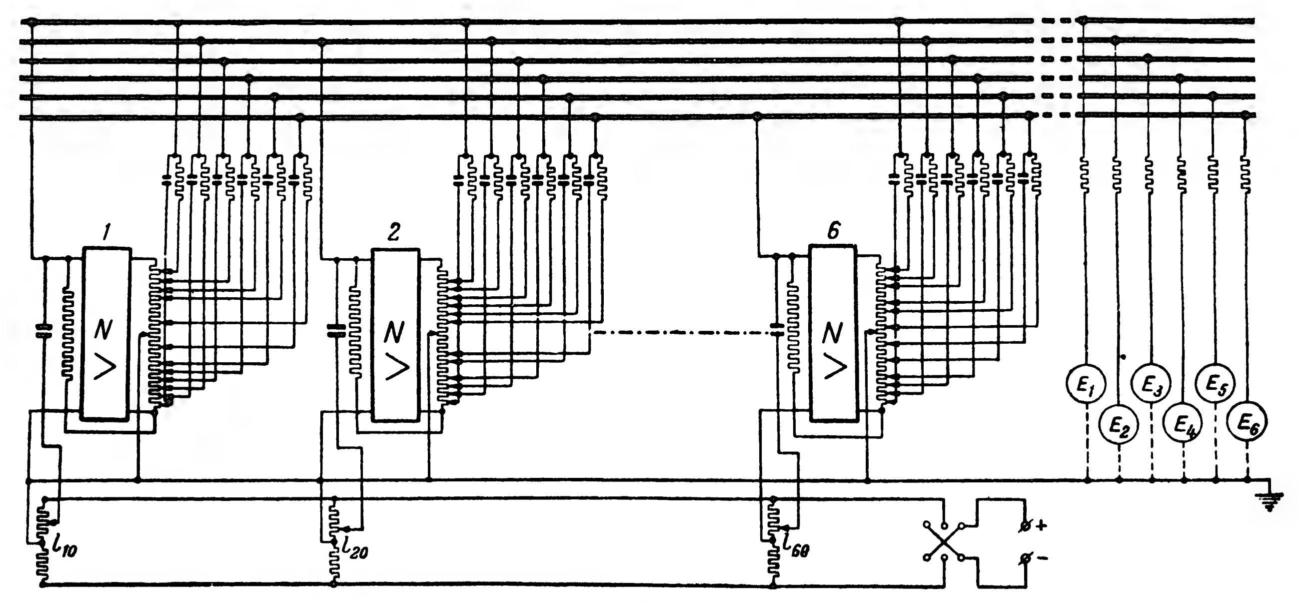


Рис. 1.

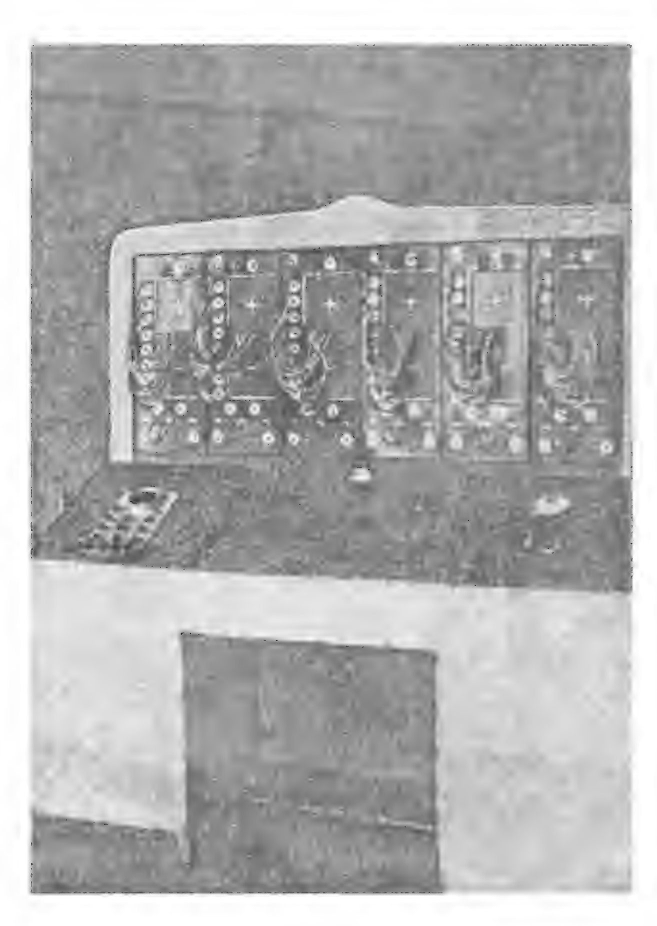


Рис. 2.

сборка электроинтегратора для решения систем, содержащих до 12 дифференциальных уравнений.

Как показали исследования [Л. 3, 4], простое преобразование заданной системы уравнений к треугольному виду является достаточным (но не необходимым) условием того, что дополнительные корни, обусловленные собственными параметрами усилителей, не внесут неустойчивости. Более того, что решение, получающееся в действительной системе уравнений для схемы *1*, будет весьма близко к решению заданной системы уравнений. Погрешность решения ряда задач на новом интеграторе лежит в пределах 3—5%.

Устройство состоит из блоков по числу зависимых переменных в системе уравнений. В каждый блок входит выпрямитель, усилитель с двумя делителями на выходе и группа сопротивлений и емкостей связей. Внешний вид устройства показан на рис. 2. Основу схемы составляют усилители, соединенные между собой при помощи связей из активных проводимостей (проволочных) и емкостей. На выходе каждого усилителя имеется по одному делителю напряжения в каждом плече. Приключением емкостей и проводимостей связей к различным точкам делителей имеется возможность набрать заданные значения коэффициентов решаемой системы дифференциальных уравнений. Наблюдение получаемых решений осуществляется при помощи катодного осциллографа, встроенного в электроинтегратор. Имеется также возможность включения шлейфового осциллографа. Усилители имеют симметричный выход с сопротивлением делителя в каждом плече, равным 500 Ω. Амплитуда напряжения на выходе в каждом плече — до 38 V при клирфакторе не более 0,2%. Коэффициент усиления в каждом плече $N=7$.

Регулировка коэффициента усиления осуществляется изменением коэффициента негативной обратной связи потенциометрами, помещенными на панели делителей. В полосе пропускания усилителей от 2 до 320 Hz сдвиг фаз между напряжениями входа и выхода менее 0,2°.

Изменение коэффициента усиления не превышает $\pm 0{,}2\%$ при колебаниях напряжения сети на $\pm 6\%$ от номинального.

Приступая к решению задач на интеграторе, предварительно проверяют соответствие коэффициента усиления усилителей его номинальному значению. Примененный способ проверки, пред-

ложенный Н. В. Корольковым, заключается в том, что для этой цели решается уравнение

$$7 \cdot C \frac{du}{dt} + 7 \cdot G u_i - G N u_i = 0$$

для каждого усилителя при начальных условиях $u_{i0} = 1$.

Если коэффициент усиления близок к своему номинальному значению, то наблюдаемый процесс должен быть незатухающим, и для малого отрезка времени решение изобразится прямой, параллельной оси абсцисс. Этот метод позволяет в течение 3—5 min перед началом работы настроить коэффициенты усиления всех усилителей с точностью до 0,05%.

В описываемом устройстве имеется шесть панелей (по числу усилителей), образующих «матрицу» электроинтегратора. На каждой панели установлены два делителя на 100 делений, что позволяет набрать первые два знака коэффициентов при членах уравнений. Верхний делитель дает возможность получить положительные значения коэффициента усиления, а нижний—отрицательные значения. Устройство позволяет устанавливать значения коэффициентов до третьего знака. Третий знак получается при помощи градуированных на 10 делений круглых потенциометров, размещенных на той же панели рядом с делителями.

На обратной стороне панелей делителей укреплены активные и реактивные (емкостные) проводимости. Активные проводимости выполнены в виде проволочных сопротивлений по 40 000 Ω, емкостные — в виде конденсаторов емкостью по 20 000 μμF.

Перед тем как приступить к набору коэффициентов системы уравнений, необходимо осуществить следующую подготовительную работу:

1. Если задано одно уравнение высшего порядка, то его преобразуют предварительно в систему уравнений первого порядка (что выполняется почти автоматически при записи уравнений в виде матриц).

2. Преобразуют известным методом матрицу коэффициентов заданной системы уравнений к треугольному виду.

3. Для получения положительных знаков при коэффициенте при производной в диагональном члене делят уравнения, не удовлетворяющие этому, на —1.

4. Чтобы все коэффициенты уравнений не превосходили по абсолютной величине единицы, делят каждое уравнение на значение максимального коэффициента.

5. Если после всех вышеуказанных преобразований коэффициенты при производных в уравнениях значительно меньше единицы, целесообразно изменить масштаб времени M_t так, чтобы максимальный коэффициент при производной был бы возможно ближе к единице. Для этого нужно разделить на выбранный масштаб времени M_t все коэффициенты при производных.

Все указанные преобразования весьма просты и занимают мало времени. После их выполнения полученные коэффициенты уравнений системы набираются на интеграторе следующим образом.

Все коэффициенты за исключением диагональных коэффициентов при производных задаются путем подключения соответствующих пронумерованных шнуров к гнездам делителя, дающим необходимый знак и значение коэффициента. Диагональные коэффициенты при производных задаются с учетом того, что при включении диагональной емкости к нулю диагональный коэффициент будет равен $+1$. Следовательно, если данный коэффициент меньше единицы, то следует диагональную емкость включить к той точке делителя, которая соответствует дополнению для этого коэффициента до единицы со знаком минус.

В описываемом устройстве для задания правой части используются усилители, не участвующие в решении заданной системы уравнений. Правая часть вида: 1) $\varphi_i(t) = \text{const}$ получается от одного усилителя (такого вида функция получается при настройке коэффициента усиления); 2) $\varphi_i(t) = kt$ получается при двух усилителях, как интеграл от постоянной; 3) $\varphi_i(t) = I_0 e^{\pm kt}$ получается при решении дифференциального уравнения первого порядка с одним усилителем; 4) $\varphi_i(t) = kt^n$ получается при $(n+1)$ усилителе как n-кратный интеграл от постоянной; 5) $\varphi^i(t) = \cos(\omega t + \psi)$ или $\varphi_i(t) = \text{ch}(\omega t + \psi)$ или $\varphi_i(t) = \text{sh}(\omega t + \psi)$ получается при двух усилителях как решение соответствующих дифференциальных уравнений второго порядка при надлежащих начальных условиях.

Задание начальных условий заключается в том, что все конденсаторы, подключенные ко входу данного усилителя, должны получить заряды, связанные с начальным значением напряжения на входах усилителей.

Необходимое для этого напряжение e_{i0}, прикладываемое к конденсатору для начальных условий, находится из соотношения

$$e_{i0} = \sum_{k=1}^{n} b_{ik} u_{k0}. \quad (i = 1, 2, \ldots n)$$

Напряжения получаются от круглых потенциометров, соединенных попарно последовательно и установленных внизу на панелях интегратора; средние точки выведены к общей нулевой шине. Под панелями делителей в центре интегратора имеется вольтметр с вольтметровым переключателем для проверки значений и знака e_{i0}. Все пары делителей включены параллельно и при помощи реле подключаются к батарее. Такой схемой обеспечивается одновременность включения всех конденсаторов начальных условий.

Релейной схемой обеспечивается периодическое повторение решений.

Для анализа полученного решения необходимо учесть масштаб по оси абсцисс и масштаб по оси ординат. Масштаб по оси ординат равен произведению масштаба начальных условий и масштаба осциллографа. Масштаб осциллографа можно определить, если задать на вход любого усили-

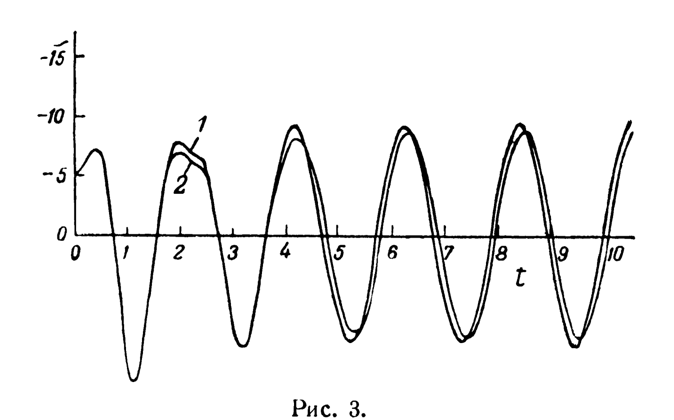


Рис. 3.

теля напряжение, равное единице начальных условий при $b_{kk}=1$ и $b_{ki}=a_{ki}=a_{ik}=0$. Высота получаемого на выходе прямоугольного импульса равна масштабу осциллографа. Масштаб по оси абсцисс

$$M_{абсц}=M_{t\ инт}M_{t}M_{разв},$$

где

$$M_{t\ инт}=R_{связи}C_{связи}=\frac{C_{связи}}{G_{связи}}=8\cdot10^{-4}\text{sec};$$

$M_{разв}$ —масштаб развертки осциллографа, mm/sec.

Пользуясь этими масштабами, переходим от осциллограмм к искомой кривой решения. Для этого делим полученные на осциллограмме размеры по оси абсцисс на $M_{абсц}$ и по оси ординат на $M_{орд}$.

Примеры решений. На новом электроинтеграторе решено уже значительное число задач. Приводим некоторые решения:

1. Задано уравнение 4-го порядка:

$$\frac{d^4x}{dt^4}+\frac{d^3x}{dt^3}+45{,}25\frac{d^2x}{dt^2}+9\frac{dx}{dt}+326x=0.$$

При начальных условиях

$$t=0;\ x_0=-5;\ \left(\frac{dx}{dt}\right)_0=-2{,}5;\ \left(\frac{d^2x}{dt^2}\right)=88{,}75;\ \left(\frac{d^3x}{dt^3}\right)_0=269{,}4.$$

Введем новые переменные:

$$u=\frac{dx}{dt};\ v=\frac{d^2x}{dt^2}=\frac{du}{dt};\ w=\frac{d^3x}{dt^3}=\frac{dv}{dt}.$$

Получим систему уравнений:

$$\frac{dw}{dt}+w+45{,}25\,v+9\,u+326\,x=0,$$

$$-w+\frac{dv}{dt}=0,$$

$$-v+\frac{du}{dt}=0,$$

$$-u+\frac{dx}{dt}=0,$$

Начальные условия:

$$x_0=-5;\quad u_0=-2{,}5;\quad v_0=-88{,}75;\quad w_0=+269{,}4.$$

Записанное при помощи осциллографа решение $x=f(t)$ приведено на рис. 3.

Аналитическое решение для данной задачи имеет вид:

$$x=-10\cos 3t+5\,e^{-0{,}5t}\cos 6\,t.$$

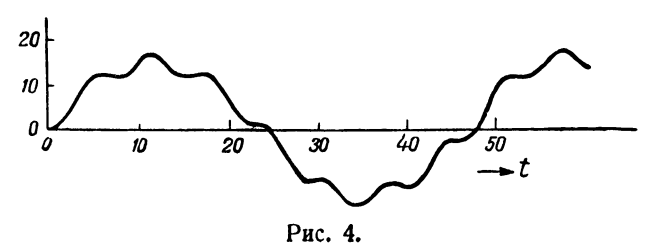


Рис. 4.

Сопоставляя решения, полученные при помощи интегратора и аналитически, мы находим, что порядок погрешности по амплитуде составляет 5%, по частоте — порядка 2% (на втором периоде); погрешность в величине максимального значения (пик кривой) составляет около 1%.

На рис. 3 вместе с осциллограммой *1*, соответствующей решению поставленной задачи, приведена также осциллограмма *2*, представляющая решение той же задачи при вариации одного параметра, т. е. когда коэффициент b_{11} был увеличен на 2%. Мы видим, следовательно, что при получении решения, близкого к незатухающему колебательному процессу, желательно проверить влияние незначительных изменений коэффициентов уравнений для установления границы возможной погрешности.

2. Задана система уравнений:

$$\frac{du_1}{dt}+0{,}0911\,u_2=9{,}45\sin 0{,}963\,t\,(=u_3),$$

$$\frac{du_2}{dt}-0{,}199\,u_1=0.$$

Начальные условия: $u_{10}=u_{20}=0$.

Правую часть $\varphi_i(t)=9{,}45\cdot\sin 0{,}963\ t\,(=u_3)$ получаем как решение вспомогательной системы уравнений:

$$\frac{du_4}{dt}-0{,}963\,u_3=0,$$

$$\frac{du_3}{dt}+0{,}963\,u_4=0,$$

при $u_{40}=9{,}45$ (условных единиц).

Осциллограмма решения для $u_2=f(t)$ дана на рис. 4. Соответствующее аналитическое решение

$$u_2(t)=14{,}4\ \sin 0{,}157\ t-2{,}06\sin 0{,}963\ t.$$

Погрешность по частоте и амплитуде не превышает 1%.

На новом устройстве решены также дифференциальные уравнения более высокого порядка [Л. 7].

На основании имеющихся материалов можно рекомендовать описываемое устройство для моделирования различных динамических систем, описываемых системами дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами.

Литература

1. Л. И. Гутенмахер. Электрические схемы для решения систем уравнений. Доклады Академии наук СССР, 1945.
2. Л. И. Гутенмахер, Н. В. Корольков и В. А. Тафт. Электрические схемы для решения систем уравнений. Электричество, № 4, 1945.
3. Л. И. Гутенмахер, И. С. Градштейн и В. А. Тафт. Электричество, № 3, 1946.
4. И. С. Градштейн и В. А. Тафт. Исследование влияния собственных параметров усилителей в матричных схемах. Известия АН СССР, ОТН, № 1, 1946.
5. Н. В. Корольков. Результаты разработки и испытания опытной установки для решения системы дифференциальных уравнений. Известия АН СССР, ОТН, № 5, 1947.
6. И. С. Градштейн. Устойчивость работы матричных схем с усилителями. Известия АН СССР, ОТН, № 5, 1947.
7. Г. Л. Полисар. Электрические методы решения некоторых задач динамики самолета. Техника воздушного флота № 7, 1947.

◇ ◇ ◇

Рациональная схема короткой сети электрической печи с прямоугольной ванной

Инж. Б. М. СТРУНСКИЙ

Севзапэнергочермет

Электроды в печах с прямоугольными ваннами вследствие несимметричного расположения в печи нагружаются неравномерно; эта неравномерность тем больше, чем выше общая мощность печи. Вследствие этого недостатка прямоугольные печи получили малое распространение. Между тем, с эксплоатационной точки зрения прямоугольная ванна имеет существенные преимущества перед круглой, заключающиеся в удобстве обслуживания колошника и электродов и в возможности наиболее полно механизировать подачу шихты в печь.

В случае равенства токов I в фазах, мощность, выделяющаяся в 1-м горне, будет меньше мощности, выделяющейся во 2-м горне, а мощность 3-го горна будет больше мощности 2-го горна на величину

$$\Delta p = \sqrt{3} I^2 (X_a - X_b) - (X_{11} - X_{22}),$$

где X_a и X_b — реактивные сопротивления крайней и средней фазы; X_{11} и X_{22} — реактивные сопротивления соответствующих фаз, обусловленные их потоками самоиндукции

Если $X_{11} = X_{22}$, то $\Delta p = \sqrt{3} I^2 (X_a - X_b)$.

Величина переносимой мощности пропорциональна разности реактивных сопротивлений крайней и средней фаз, которая обязана разнице в величине потоков взаимоиндукции для этих фаз. Для того чтобы избежать переноса энергии, необходимо иметь такую короткую сеть, для которой разность $(X_a - X_b)$ была равна нулю или, по крайней мере, очень мала. Достичь этого для обычной короткой сети, обтекаемой линейным током, не представляется возможным.

На рис. 1 представлена типичная для печей с прямоугольными ваннами схема короткой сети для карбидной печи мощностью 8 500 kVA. Главный пакет выполнен из медных полос, причем полосы разных фаз перешихтованы. Вблизи печи произведена расшихтовка и пакет разделяется на три рукава: два длинных, идущих к крайним электродам, и короткий, подходящий к среднему электроду. Остальные участки: гирлянда, выполненная из тонких медных лент, и токоподвод к электродам, выполненный из трубок, конструктивно подобны для разных фаз и почти равны по длине. Участками, определяющими величину общей реактивности, являются все участки, за исключением шихтованного пакета, влияние которого, несмотря на его сравнительно большую длину, очень мало. Участками, определяющими перенос энергии, являются: гирлянда, токоподводящие трубки, электроды, участки в районе расшихтовки, магнитные поля которых не взаимно перпендикулярны. Реактивность такой короткой сети всегда будет значительна.

Была также предложена схема, в которой главный пакет выполняется из трубок, а пакету придается форма лиры (рис. 2). Поскольку шихтовка труб разных фаз осуществляется до гирлянды, такая сеть обладает малой реактивностью. Однако, факторы, вызывающие перенос энергии, в данной схеме остаются.

Наши ферросплавные и карбидные печи имеют короткие сети, выполненные по схемам рис. 1 и 2 или аналогичным им.

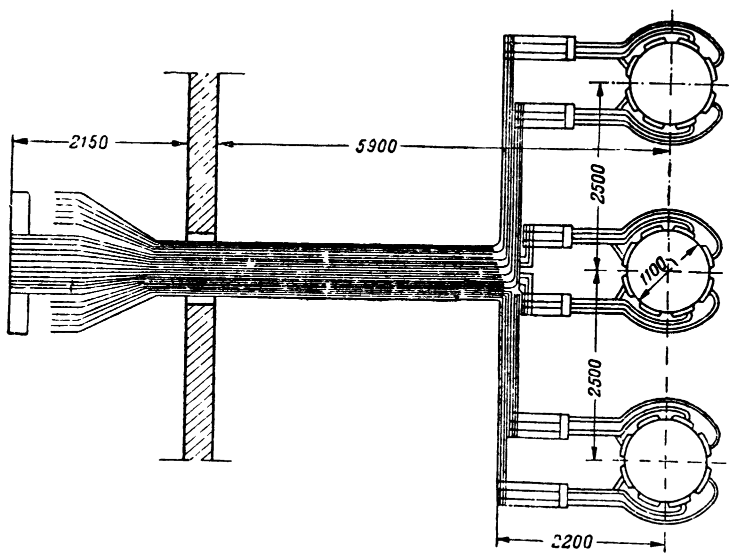


Рис. 1.

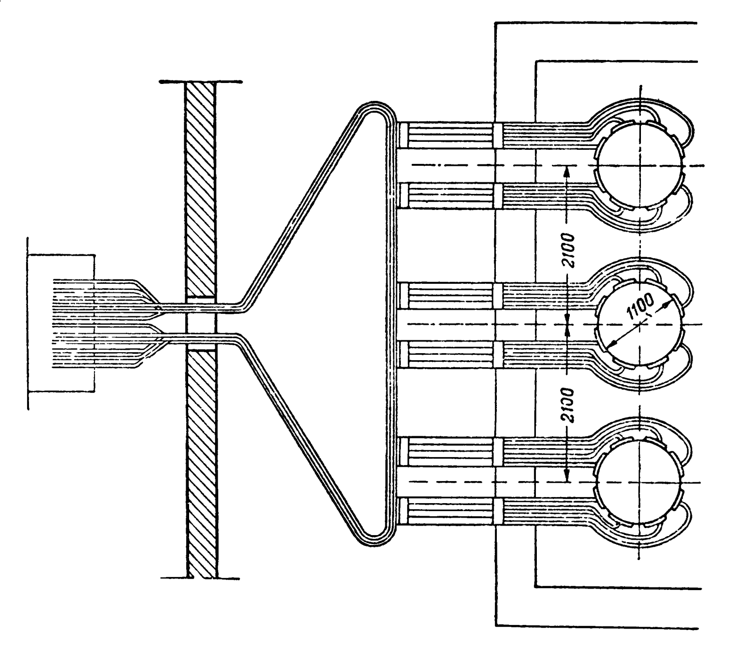


Рис. 2.

Пример рациональной конструкции. На рис. 3 приведена схема короткой сети — вариант ошиновки печи (рис. 1). Принципиальное отличие ее заключается в том, что к электродам подводятся фазные токи, а не линейные, т. е. подводятся начала и концы вторичных катушек печного трансформатора и соединения катушек производятся не в трансформаторе, а на электродах.

Вместо одного массивного пакета от трансформатора (или от трех однофазных трансформаторов) к печи подходят три более легких пакета. В каждом пакете проложены прямые и обратные шины, идущие к выводам фазы трансформатора, т. е. пакет обтекается в $\sqrt{3}$ раз меньшим током. Реактивность такой ошиновки, естественно, очень мала. Шихтованные пакеты подводятся как можно ближе к печи. Здесь они расшихтовываются и к электроду направляются — начало одной фазы и конец другой. Реактивность этих участков меньше, чем аналогичных участков сети рис. 1, поскольку токи в шинах сдвинуты на 120°, и результирующий поток, охватывающий пакеты, уменьшен. Такое же положение имеет место и для гирлянды и для труб, подходящих к электроду. В то время как в сети рис. 1 параллельные ветви фазы стараются раздвинуть с целью уменьшения ее реактивности, здесь из этих же соображений необходимо, наоборот, прокладывать ветви как можно теснее. Общая реактивность такой короткой сети может быть сделана меньше, чем сети, рассчитанной на линейный ток. Эффект переноса мощности присущ и данной сети, но путем соответствующей транспозиции и подбора расстояний и длин участков мощность переноса может быть сделана весьма малой. Расчеты подтверждают это. Для расчета приняты следующие конструктивные данные:

Шихтованные пакеты (*А* на рис. 3) выполнены из медных полос 300 mm × 10 mm. В каждом пакете 8 таких полос, так что сечение меди фазы — 12 000 mm². Расстояние между полосами в свету — 20 mm. Размеры пакета: высота — 300 mm, ширина — 220 mm.

Подход к гирлянде *Б* состоит из двух пакетов; каждый пакет состоит из четырех полос 300 mm × 10 mm. Размеры пакета 300 mm × × 100 mm. Пакеты проложены рядом с расстоянием между ними 120 mm (по осям пакетов).

Гирлянда *В* каждой фазы собрана из 24 медных кабелей общим сечением 12 000 mm². Высота пакета кабелей — 360 mm, ширина — 210 mm. Расстояние между двумя такими пакетами, подходящими к каждому электроду, 300 mm (по осям пакетов). Длина гирлянды крайних электродов — 2 500 mm, а гирлянды среднего электрода — 1 800 mm.

Токоподвод *Г* от гирлянды к контактным щекам выполнен медными трубками диаметром 60/30 mm; количество трубок на фазу 4 (на электрод—8); сечение меди на фазу—8 480 mm². Длина трубок от 1,4 до 3,6 m.

Расчет дает реактивные сопротивления фаз

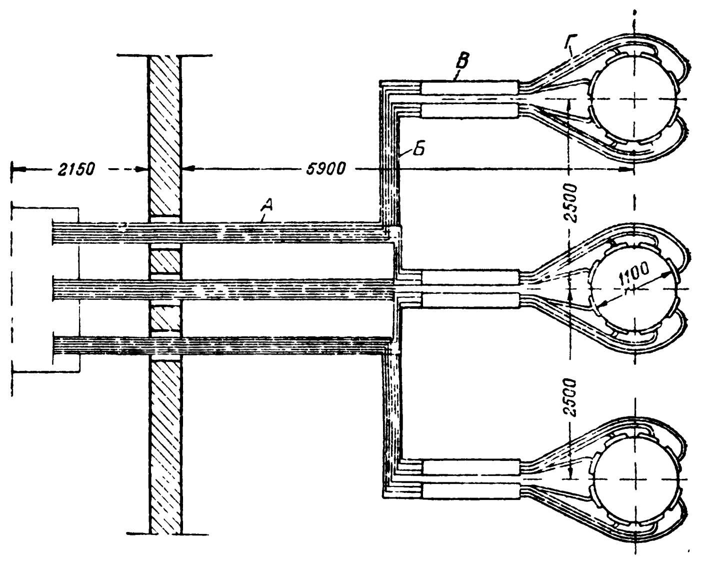


Рис. 3.

короткой сети: крайних — по 0,9 mΩ, средней — 0,49 mΩ. Среднее значение: $X_{ср} = 0,763$ mΩ. Величина переносимой мощности (для тока в электродах 34 000 A):

$$\Delta p = \sqrt{3}\cdot 34\,000^2[(2\,864-1\,577)-(3\,589-2\,426)]2\pi\cdot 50\cdot 10^{-9} = 90 \text{ kW},$$

т. е. всего около 3% от мощности фазы. Получающаяся неравномерность незначительна и не отразится на работе крайних электродов.

Большим достоинством схемы является также более низкая реактивность; для короткой сети, подобной рис. 1, при расстоянии между электродами 2 100 mm, по замерам М. А. Ченцова, $X_{ср} = 1,07$ mΩ. С увеличением распада электродов реактивное сопротивление также увеличивается; с уменьшением реактивного сопротивления увеличивается напряжение на дуге и ее мощность и, следовательно, увеличивается продуктивность печи и экономичность процесса.

Для схемы рис. 3 при линейном напряжении на выводах трансформатора 140 V напряжение на дуге равно 76 V; cos φ (без учета реактивности трансформатора) равен 0,94, активная мощность на выводах низкого напряжения трансформатора — 7 750 kW. Для схемы рис. 1 при тех же $U_{лин}$ и токе напряжение на дуге 72 V, $\cos\varphi = 0,89$, мощность 7 350 kW.

Схема рис. 3 дает повышенный в $\frac{2}{\sqrt{3}}$ раз или на 15,6% расход меди на ошиновку, но этот недостаток искупается описанными выше достоинствами схемы.

Для выполнения схемы вторичные катушки трансформатора должны быть рассчитаны на линейное напряжение, а все концы катушек выведены наружу бака.

Достоинства схемы фазного тока по рис. 3 настолько существенны, что не только новые установки должны снабжаться этими схемами, но вполне целесообразно переоборудовать и существующие установки.

◇ ◇ ◇

Обзоры и рефераты



Новая техника в производстве конденсаторов

Бумажные конденсаторы. Интересные данные получены по применению прогрева конденсаторных секций на воздухе при повышенной температуре в качестве предварительной операции перед проведением нормальнего процесса вакуумной сушки и пропитки [Л. 1]. Известно, что нагрев на воздухе при температурах выше 100° С вызывает окисление клетчатки и дает заметное снижение механической прочности конденсаторной бумаги. Считалось, что эти признаки начинающегося термического разрушения бумаги свидетельствуют о том, что такая бумага является уже частично испорченной и в дальнейшем при воздействии электрического поля в готовом конденсаторе будет работать неудовлетворительно.

В соответствии с этим применение температуры даже порядка 130—135° С допускалось только в условиях сушки бумаги при высоком вакууме и то с большой осторожностью. Применение температуры такого порядка при нагреве на воздухе считалось совершенно недопустимым. Однако, проведенные опыты показали, что окисление бумаги, сопровождающееся заметным потемнением ее и понижением прочности на разрыв, не только не ухудшает электрических свойств конденсатора, но в известных условиях может даже привести к их заметному улучшению Опыты были проведены с конденсаторными секциями, намотанными из крафтцеллюлозной бумаги (2 и 3 слоя по 10 μ) и алюминиевой фольги. После термической обработки на воздухе эти секции сушились под вакуумом и пропитывались пентахлордифенилом, стабилизированным добавкой 1,5% антрахинона. Термическая обработка в течение 40 h при 135° С на воздухе дала повышение сопротивления изоляции готовых конденсаторов (измеренного при температуре 65° С) в среднем в 3 раза по сравнению с конденсаторами, изготовленными из секций, не подвергавшихся термической обработке. Срок жизни конденсаторов, не подвергавшихся термической обработке, при длительном действии постоянного напряжения при повышенной температуре также оказался заметно пониженным.

Термическая обработка при 180 ÷ 200° С в течение 16h по данным другого опыта дала следующие изменения электрических свойств готовых конденсаторов по сравнению с контрольными образцами, при изготовлении которых не применялась термическая обработка: сопротивление изоляции, измеренное при 65° С, повысилось в 2 ÷ 2,5 раза, а измеренное при 100° С — в 1,5 ÷ 1,7 раза; угол потерь, измеренный при 1 kHz и 65° С, снизился, но незначительно, в то время как значения угла потерь, измеренные при температуре 100° С, снизились более чем в 2 раза. Наблюдающееся улучшение электрических свойств объясняется тем, что окисление клетчатки (в определенных пределах) активизирует ее способность к присоединению свободных ионов. При этом происходит своеобразный процесс очистки пропиточной массы от свободных ионов, которые захватываются клетчаткой, снижается ионная проводимость, улучшается сопротивление изоляции и уменьшается угол потерь. Отмечается, что термическая обработка с успехом применяется на производстве уже в течение ряда лет. Тем не менее, практическое внедрение этого метода в наших условиях не следует рекомендовать без предварительного проведения соответствующих испытаний, которые должны иметь своей целью проверку литературного сообщения применительно к нашему качеству материалов.

Современные вакуумные установки для сушки и пропитки кабелей с бумажной изоляцией и бумажных конденсаторов позволяют достигать в промышленных условиях остаточного давления порядка 0,01 mm рт. ст. Время сушки в ряде случаев достигает двух недель. Мощность, необходимая для получения столь низкого остаточного давления, в производственных вакуумных установках относительно невелика: 11 kW для привода насоса предварительного вакуума и 2 ÷ 3 kW для диффузионного насоса с производительностью 3 000 l/sec. Приведена [Л. 2] принципиальная схема современной вакуумной сушильно-пропиточной установки и дана кривая зависимости остаточного давления от времени откачки. Снижение давления до нескольких сотых долей миллиметра ртутного столба происходит за 2 ÷ 3 h.

Бумажные конденсаторы, пропитанные жидким диэлектриком и предназначенные для работы в цепях постоянного тока, при достаточно больших значениях емкости обычно изготовляются с 3 слоями бумаги между обкладками. При обычном нижнем пределе толщины бумаги 6,5 ÷ 7 μ рабочее напряжение для таких конденсаторов составляет около 600 V (напряженность поля порядка 30 kV/mm). Применение нового сорта бумаги позволило при сохранении трехслойного диэлектрика снизить значение удельного объема конденсаторов этого типа на 24 ÷ 51% с понижением рабочего напряжения до 400 V постоянного тока [Л. 3]. Учитывая, что удельный объем в первом приближении пропорционален квадрату толщины диэлектрика, можно прийти к выводу о том, что здесь применена конденсаторная бумага с толщиной порядка 5 μ.

Как мы сообщали ранее [Л. 4], была установлена эмпирическая зависимость между сроком жизни конденсатора τ и приложенным к нему напряжением U

$$\tau = \frac{A}{U^m}, \tag{1}$$

Практическое применение этой зависимости позволяет повышать рабочее напряжение конденсатора при условии соответствующего снижения его срока службы. Для одного из типов конденсаторов с большим запасом электрической энергии, применяемых в комбинации со специальными лампами для получения мгновенной вспышки света для целей фотографирования [Л. 5], указывается, например, что его рабочее напряжение составляет 2 500 V при гарантированном сроке службы 1 000 h и 2 880 V при сроке службы 400 h. Подставив эти значения в выражение (1), находим, что в данном случае для расчета было использовано значение $m = 6{,}4$. В литературе указывалось, что значение m может колебаться для разных типов бумажных конденсаторов в пределах 4 ÷ 8.

Современная герметическая конструкция бумажного конденсатора осуществляется на принципе сочетания металла со стеклом или керамикой. Для малогабаритных конденсаторов уже в течение ряда лет применяются специальные стеклянные изоляторы небольшого размера, но герметизация конструкции высоковольтных конденсаторов, имеющих относительно большие размеры и толстостенные корпуса, представляла относительно большие трудности. Стеклянные изоляторы для таких конденсаторов не изготовлялись, а применение фарфоровых изоляторов высокого напряжения с металлизацией части их поверхности для впайки в металлическую крышку конденсатора было технологически неудобным. При спаивании тонкого металлического слоя с толстой крышкой трудно было получить надежную спайку и возникал большой брак. Эту трудность можно было преодолеть за счет усложнения конструкции и технологии обработки.

В настоящее время освоен выпуск литых стеклянных изоляторов высокого напряжения, позволяющий значительно упростить сборку герметизированных высоковольтных конденсаторов [Л. 6]. В процессе отливки в стекло заплавляются центральный контактный болт и металлическая шайба, которая может быть легко припаяна к крышке конденсатора. Температурные коэффициенты расширения стекла и металлических деталей, заплавляемых в стекло, подобраны так, чтобы избежать растрескивания стекла при возможных колебаниях температуры.

Пленочные конденсаторы. Мы уже сообщали ранее [Л. 7] о появлении нового типа конденсаторов «пластикон» с диэлектриком из нагревостойкой синтетической пленки, предназначаемых для замены бумажных конденсаторов и пленочных конденсаторов типа «электрофильм», предназначенных для замены слюдяных блокировочных конденсаторов, работающих в цепях постоянного или выпрямленного тока. В обоих типах конденсаторов, повидимому, применялась синтетическая пленка с большим углом потерь ($\mathrm{tg}\,\delta \approx \approx 0{,}01$).

В конце 1947 г. появилось сообщение о новой серии конденсаторов типа „пластикон", изготовленных из синтетической пленки типа L с углом потерь меньшим, чем у слюды [Л. 8]. Конденсаторы помещаются в стеклянные трубки, закрытые с торцов припаянными к стеклу металлическими колпачками, и заливаются кремнийорганической жидкостью. Для этих конденсаторов рабочее напряжение постоянного тока 3 500 V; испытательное напряжение 7 500 V; номинальная емкость от 50 до 10 000 μμF. Конденсатор на 1 000 μμF имеет диаметр 15 mm и длину 40 mm. Допускаемая нагрузка током высокой частоты для такого конденсатора составляет: 0,31 A при 100 kHz; 0,94 A при 300 kHz; 2,5 A при 1 MHz и 4,5 A при 3 MHz; Это соответствует значениям рабочего напряжения 500 V при 100 ÷ 300 kHz; 400 V при 1 MHz и 240 V при 3MHz и максимальному допускаемому значению реактивной мощности 1 kVAr. Этот тип конденсатора имеет марку LSG, в отличие от старого типа, имевшего марку ASG. В этих обозначениях A и L, повидимому, означают тип пленки, S — заливку кремнийорганической жидкостью (силиконом), а G — стеклянный корпус. Внедрение синтетических пленок в конденсаторостроение продолжает расширяться. Этот тип диэлектрика в ближайшем будущем, несомненно, сделается одним из основных материалов конденсаторного производства, особенно при изготовлении конденсаторов с относительно большой емкостью.

Слюдяные конденсаторы. Было произведено исследование емкости образцов слюды — мусковита от температуры и давления [Л. 9]. Была исследована слюда с воздушными включениями (до 30% площади кристаллов) и чистая слюда (не более 2% воздушных включений). Подсчет содержания воздушных включений производился Шиком по методу М. М. Михайлова [Л. 10]. Образцами служили пластинки слюды прямоугольной формы (28mm× × 15 mm) при толщине 0,03 ÷ 0.04 mm. Электроды на образцы наносились методом вжигания серебряной пасты. Измерение изменений емкости исследуемых образцов производилось методом биений. При среднем значении емкости образца, равном 200 μμF, измерение проводилось при частоте 1,5 MHz. Измерительная установка имела чувствительность порядка 0,001 μμF. Нагрев испытуемых образцов проводился в специальном термостате с обогревом образца потоком горячего воздуха (1,5 dm³/sec). Перед измерением образцы подвергались сушке при 120°C в течение 8 h и выдержке в сухом эксикаторе в течение 4 дней. Никаких защитных покровов на образцы не наносилось.

Для чистой слюды температурный коэффициент емкости оказался положительным и для пределов изменения температуры от +30 до +50° C у разных образцов лежал в пределах от 6 до $40 \cdot 10^{-6}$ на 1° C. Уменьшение емкости образцов чистой слюды при изменении давления от 760 до 125 mm рт. ст. составляло для разных образцов от 0,001 до 0,038%. Для образцов слюды, содержащих воздушные включения, температурный коэффициент емкости в большинстве случаев был отрицательным и лежал в пределах от —220 до $-1 \cdot 10^{-6}$, но у некоторых образцов имел положительные значения (до $+35 \cdot 10^{-6}$ на 1° C). В отличие от образцов, не содержащих воздушных включений и имеющих линейную зависимость емкости от температуры, образцы с воздушными включениями имеют нелинейную зависимость и часто дают необратимое изменение емкости после прогрева. При изменении давления в указанных выше пределах наблюдалось значительное снижение емкости образцов, содержащих воздушные включения (до 2,2%).

Автор [Л. 9] приходит к выводу о том, что слюдяной конденсатор, тщательно изготовленный из чистой слюды, не содержащей воздушных включений, должен иметь положительный температурный коэффициент и линейно изменять емкость с температурой. Аномальное поведение технических слюдяных конденсаторов при колебаниях температуры или резком снижении давления следует отнести за счет недостатков технологии, обусловивших нахождение в электрическом поле конденсатора каких-либо иных диэлектриков, кроме слюды, или же наличием в последней воздушных включений. Для того чтобы обеспечить удовлетворительное качество слюдяного конденсатора, содержание воздушных включений не должно превышать 2% от всей площади слюды.

Вакуумные конденсаторы. Повышенная электрическая прочность вакуума известна уже давно, но лишь в последние годы этот вид диэлектрика нашел применение в конденсаторостроении [Л. 11]. Основным толчком для разработки вакуумных конденсаторов послужила необходимость повышения качества конденсаторов, применяемых в радиооборудовании высотных самолетов. При высотах порядка 12 km приходится считаться с резким понижением давления и температуры. Понижение давления дает заметное уменьшение пробивного напряжения обычного воздушного конденсатора; при быстром снижении самолета на обкладках воздушного конденсатора, охладившихся на большой высоте, интенсивно конденсируется влага, что вызывает коррозию пластин. Вакуумный конденсатор не обладает этими недостатками; кроме того, он имеет малый объем (в 10 раз меньше объема слюдяного конденсатора той же емкости при той же допускаемой нагрузке), весьма малые потери (не больше, чем у лучших воздушных конденсаторов) и очень малый температурный коэффициент емкости.

При зазоре между обкладками 1,5 mm и остаточном давлении 0,001 mm рт. ст. допускаемое амплитудное напряжение для вакуумного конденсатора составляет 25 kV. Цилиндрическая форма конденсатора улучшает жесткость конструкции и уменьшает изменения емкости от температуры. В цилиндрическом конденсаторе изменение емкости, обусловленное тепловым расширением металла, пропорционально удлинению цилиндрических обкладок. Это изменение ослабляется за счет влияния теплового расширения стеклянной колбы, служащей корпусом конденсатора. Подбирая состав стекла и металла электродов, можно получить практически нулевое значение температурного коэффициента емкости. В качестве металла для обкладок и других частей конденсатора, расположенных внутри колбы, рекомендуется тантал, так как он меньше других металлов склонен отдавать остаточный газ после откачки колбы. Выводы конденсатора осуществляются в виде трубок, что облегчает коаксиальность цилиндрических обкладок при сборке и улучшает отвод тепла, выделяемого в конденсаторе потерями в металле.

При высоких рабочих частотах потери получаются значительными даже при малом значении угла потерь и емкости конденсатора. Например, при емкости 50 μF и $\mathrm{tg}\,\delta = 1 \cdot 10^{-4}$ последовательное сопротивление, эквивалентное потерям, при частоте 1 MHz около 0,3 Ω. При токе 8 A это дает потери около 20 W. Поэтому при конструировании вакуумного конденсатора следует предусматривать достаточно большую поверхность для теплоотдачи.

В настоящее время выпускаются вакуумные конденсаторы со следующими номинальными данными: емкость 5, 10, 25, 50 и 100 μμF; допускаемая реактивная мощность 60 kVAz, допускаемое напряжение 25 kV и максимальная допускаемая сила тока 30 A. Тангенс угла потерь, измеренный при 50 kHz, оказался равным: $1 \cdot 10^{-4}$; при 50 MHz угол потерь оказался ниже предельной чувствительности измерительной установки.

Вакуумные конденсаторы применяются в авиарадиооборудовании, в переносных радиопередатчиках, в высокочастотной терапевтической аппаратуре, в устройствах для нагрева токами высокой частоты и в ряде других случаев.

Электролитические конденсаторы. В последнее время применение электролитических конденсаторов начинает расширяться, и разработаны новые конструкции таких конденсаторов [Л. 12].

Выпускается новый тип электролитического конденсатора для телевизионной аппаратуры с повышенным верхним пределом рабочей температуры (+85° C вместо +65° C, при нижнем пределе рабочей температуры — 20° C) с рабочими значениями напряжения 25; 400 и 475 V (соответственные значения пиковых напряжений 40; 475 и 525 V). Конденсаторы выпускаются в виде блоков, в которых предусмотрено резкое уменьшение емкостной связи между отдельными секциями.

Начат выпуск миниатюрных электролитических конденсаторов для висячего монтажа с анодами из травленой фольги. Диаметр конденсатора 9,5 mm, а длина от 28,5 до 41 mm. В этом габарите при рабочем напряжении 150 V можно поместить емкость от 8 до 12 μF, а при 1,5 V — от 200 до 300 μF.

Для новой серии электролитических конденсаторов большой емкости (500 ÷ 4 000 μF) при низких напряжениях наименьшие значения удельных объемов этих конденсаторов составляют: 0,025 cm³/μF при рабочем напряжении 12÷18 V; 0,055 cm³/μF при 25÷35 V и 0,090 cm³/μF при 50 V.

Стартерные электролитические конденсаторы, предназначенные для пуска однофазных двигателей и рассчитанные на кратковременное включение в цепь переменного тока 110 и 220 V, выпускались и до войны, но теперь у них снижены значения удельных объемов. Так, конденсаторы на напряжение 110 V имеют удельный объем 0,5 cm³/μF, а на 220 V — 3,7 cm³/μF.

Литература

1. D. Mc Lean. Industr. Eng. Chemistry, т. 39, № 11, 1947.
2. B. Whitehurst. El. World, т. 127, № 17, стр. 49, 1947.
3. GER, т. 50, № 1¹, стр. 53, 1947.
4. Электричество, № 12, стр. 61, 1945; № 1, стр. 95, 1946.
5. Electronics, т. 20, № 12, стр. 38, 1947.
6. GER, т. 50, № 9, стр. 53, 1947.
7. Электричество, № 2, стр. 86, 1947.
8. Electronics, т. 20, № 9, стр. 225, 1947.
9. W. Schick. JIEE, т. I, т. 94, № 80, стр. 371, 1947.
10. М. М. Михайлов. Известия электропромышленности слабого тока, № 4—5, стр. 67, 1940.
11. H. Griffith. Wireless World, т. 43, № 1, стр 23, 1947.
12. Electronics, т. 20, № 7, стр. 198 и 216; № 10, стр. 74 и 78, 1947.

Кандидат техн. наук ***В. Т. РЕННЕ***



Хроника

Валентин Петрович Вологдин

К присуждению золотой медали им. А. С. Попова

29 апреля 1948 г. Президиум Академии наук СССР присудил золотую медаль им. А. С. Попова члену-корреспонденту Академии наук СССР Валентину Петровичу Вологдину за выдающиеся работы и изобретения в области радио.

Золотая медаль им. А. С. Попова учреждена Советом Народных Комиссаров СССР 2 мая 1945 г. в связи с 50-летием со дня изобретения радио и в целях увековечения памяти изобретателя радио А. С. Попова.

Конкурс на соискание золотой медали им. А. С. Попова был объявлен в августе прошлого года[1]. Кандидатуры, представленные на конкурс, обсуждались советской научной общественностью. Различные научные учреждения, министерства, высшие учебные заведения, научно-исследовательские институты в своих обращениях в Президиум Академии наук поддерживали кандидатуру В. П. Вологдина.

Присуждение первой медали им. А. С. Попова является событием, имеющим важное значение в советской науке и технике. Оно подводит некоторые итоги развития советской радиотехники и подчеркивает роль достижений советских ученых на фоне мировой радиотехники. Приоритет русской науки в области теоретической радиотехники неоднократно подтверждался, развитие теоретической и практической радиотехники в годы Советской власти во многих направлениях опережало достижения зарубежных стран.

Имя В. П. Вологдина — одного из старейших и выдающихся деятелей в области радиотехники и применения токов высокой частоты для промышленных целей—хорошо известно широким кругам радиоспециалистов не одного поколения, не только в СССР, но и за границей.

Валентин Петрович родился в 1881 г. на Кувинском заводе Пермской губ., в семье горного смотрителя. В 1907 г. В. П. Вологдин окончил Технологический институт в Петербурге и был оставлен при нем для подготовки к профессорскому званию. Еще будучи студентом, В. П. Вологдин увлекался результатами опытов А. С. Попова и воспроизводил их в домашней лаборатории. Вскоре он смело взялся за конструирование и построение первых высокочастотных генераторов, на основе которых еще в дореволюционный период была создана радиосвязь на судах военно-морского флота.

После Великой Октябрьской социалистической революции В. П. Вологдин все свои силы и талант отдает созданию и развитию в СССР радиотехники и высокочастотной техники вообще, являясь одним из основателей Нижегородской радиолаборатории и создателем русской машины повышенной, а затем и высокой частоты, позволившей осуществить еще до появления техники коротких волн связь с самыми отдаленными районами СССР и с заокеанскими странами.

В. П. Вологдин принял самое деятельное участие в организации Центральной радиолаборатории в Ленинграде, в создании в стране первых крупных заводов по выпуску радиоламп. Он сконструировал первые советские ртутные высоковольтные выпрямители, открывшие после кенотрона новую эпоху в технике питания мощных радиостанций и обеспечившие высококачественную работу. Первая радиовещательная станция им. Коминтерна работала с ртутным выпрямителем В. П. Вологдина. В дальнейшем им же были построены мощные выпрямители для Ленинградской радиовещательной станции, Московского Октябрьского радиотелеграфного центра и др. Мощные цельнометаллические ртутные колбы, сконструированные В. П. Вологдиным, применяются на силовых и трамвайных подстанциях СССР. С именем В. П. Вологдина связаны многие схемы питания радиостанций, в том числе последовательная схема, а также теория работы ионных приборов на фильтр.

В. П. Вологдиным предложен новый метод генерации токов повышенной частоты при помощи нелинейного конденсатора. Широко известны работы В. П. Вологдина с диэлектриком из сегнетовой соли (1928—1930 гг.), в результате которых им были изготовлены образцы диэлектриков с большой проницаемостью.

Особенно значительны заслуги В. П. Вологдина в области промышленного применения высокочастотной техники. Созданные В. П. Вологдиным печи высокой частоты для плавки металлов нашли значительное применение. Он является пионером советской высокочастотной закалки металлов. Этот способ обработки металлов получил необычайно широкое распространение. Высокочастотная закалка и возникшие на ее основе методы упрочения деталей сыграли большую роль в достижениях оборонной промышленности в период Великой Отечественной войны.

Для В. П. Вологдина характерна не только актуальность разрабатываемых проблем, но и неутомимая организационная деятельность, направленная на внедрение в широких масштабах в практику достигнутых им результатов. За период с 1922 г. В. П. Вологдиным было зарегистри-

[1] Электричество, № 11, 1947.

ровано 74 авторских заявки на изобретения. Кроме того, значительное число патентов им было получено за границей, в частности на ртутные выпрямители.

Результаты исследований в области теории ртутных высоковольтных выпрямителей, теории ртутного машинного радиогенератора и теории высокочастотного нагрева освещались В. П. Вологдиным в многочисленных журнальных статьях, в монографиях и учебных пособиях. В. П. Вологдину принадлежит свыше 100 печатных трудов.

В 1937 г. В. П. Вологдину была присвоена ученая степень доктора техн. наук, а в 1939 г. он был избран членом-корреспондентом Академии наук СССР. В 1942 г. В. П. Вологдин получил звание заслуженного деятеля науки и техники РСФСР и в 1943 г. звание лауреата Сталинской премии. В 1944 г. правительство наградило В. П. Вологдина орденом Ленина.

В настоящее время В. П. Вологдин продолжает работу в новейших областях радиотехники, изыскивая дальнейшие пути ее развития, а также стремясь расширить применение в народном хозяйстве последних достижений высокочастотной техники. Самое деятельное участие принимает Валентин Петрович и в общественной жизни, являясь одним из видных популяризаторов науки и техники.

◇ ◇ ◇

ДИССЕРТАЦИИ

Ленинградский электротехнический институт им. Ульянова (Ленина)

В Ученом совете Ленинградского электротехнического института им. Ульянова (Ленина) защищены следующие диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук за период с декабря 1946 г. по декабрь 1947 г. и диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук за период с ноября 1946 г. по апрель 1948 г.[1]

I. Докторские диссертации

И. М. Жданов защитил 27 декабря 1946 г. диссертацию на тему «Аналитические методы расчета длины телефонных линий».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Д. С Пашенцев, доктор техн. наук, проф. В. И. Сифоров, канд. техн. наук, доц. В. Г. Малышев.

Исследованы аналитически абонентские сети с централизованным и децентрализованным станционным оборудованием. Исходя из минимума длины телефонных линий, выяснены оптимальные условия для сетей и зависимость их длины от различных факторов: характера распределения плотности абонентов, планировки города, числа станций в сети и т. д.

В. А. Бургов защитил 16 мая 1947 г. диссертацию на тему «Интенсивный фотографический метод звукопередачи с помощью модуляторов света электромеханического типа».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. С. Я. Соколов, доктор физико-матем. наук, проф. Г. Г Слюсарев и доктор техн. наук, П. Г. Тагер.

Произведено теоретическое обобщение интенсивного фотографического метода звукопередачи с помощью модуляторов света электромеханического типа и разработаны способы осуществления интенсивной записи этими модуляторами. Дан анализ основных свойств звеньев тракта звукопередачи и определены частотные характеристики отдельных процессов ее.

Л. Н. Грузов защитил 26 сентября 1947 г. диссертацию на тему «Качания модифицированного каскада Кремера».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. Е. Алексеев, доктор техн. наук, проф. Ю. С. Чечет, доктор техн. наук, проф. Д. А. Завалишин, проф. А. Я. Бергер и канд. техн. наук, доц. А. В. Берендеев.

Рассмотрены методы расчета статических и динамических режимов модифицированного каскада Кремера с учетом параметров вспомогательных машин и явнополюсности их роторов. Основные решения получены при помощи метода преобразования координат. Расчеты иллюстрированы экспериментальными данными.

Н. П. Ермолин защитил 31 октября 1947 г. диссертацию на тему «Переходные процессы в машинах постоянного тока».

Официальные оппоненты: заслуженный деятель науки и техники, доктор техн. наук, проф. С. А. Ринкевич, доктор техн. наук проф. Л. М. Пиотровский, доктор техн. наук, проф. В. Т. Касьянов и канд. техн. наук, доц. Б. И. Норневский.

Рассмотрены теория и методика расчета переходных процессов в машинах постоянного тока с учетом различных факторов, влияющих на эти процессы. Произведен количественный анализ этих факторов, дана оценка значения их и сделан вывод общей системы основных дифференциальных уравнений переходных процессов в машинах. Расчеты иллюстрированы экспериментальными данными.

Ю. А. Кацман защитил 21 ноября 1947 г. диссертацию на тему «Анализ колебательных процессов в электронном потоке».

Официальные оппоненты: доктор физико-матем. наук, проф. В. Н. Кессених, доктор техн. наук, проф. В. И. Сифоров и генерал-майор инж.-техн. службы В. Ф. Власов.

Исследован электронный поток как колебательная среда. Установлено взаимодействие этого потока с резонатором, что позволяет определить возможность получения малого уровня шумов в клистронах и повышения их к. п. д.

А. Д. Кратиров защитил 12 декабря 1947 г. диссертацию на тему «Мощный статический электромагнитный преобразователь частоты усовершенствованного типа».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Л. М. Пиотровский, доктор техн. наук, проф. Д. В. Васильев и канд. техн. наук, доц. В. И. Рудзик.

Рассмотрено преобразование трехфазного тока в однофазный с утроением частоты при помощи трехфазной группы однофазных трансформаторов. Сделан краткий обзор современного состояния вопроса и описаны различные схемы преобразователя. Произведен анализ и расчет различных режимов работы его и приведены экспериментальные данные.

II. Кандидатские диссертации

В. Ю. Рогинский защитил 15 ноября 1946 г. диссертацию на тему «Преобразование импульсов».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Н. Н. Крылов и доктор техн. наук, проф. С. Я. Соколов

Рассмотрены возможные способы преобразования импульсов по длительности их действия и рекомендации удобных инженерных методов расчета. Дан анализ различных аналитических методов расчета и произведено сопоставление расчетных и экспериментальных данных.

---

[1] Диссертации за предшествующий период см. Электричество, № 3, 1947.

А. Н. Лебедев защитил 29 ноября 1946 г. диссертацию на тему «Методика расчета счетно-решающих приборов по заданной точности».

Официальные оппоненты проф. С. А. Изенбек и канд. физико-матем. наук Г. И. Егудин.

Произведен анализ причин, влияющих на точность счетно-решающих механизмов и приборов, и дана классификация их ошибок. Расчет этих ошибок произведен с помощью теории вероятности.

П. К. Куликовский защитил 29 ноября 1946 г. диссертацию на тему «Основные положения выбора параметров многомоторных электроприводов бумажных машин».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. С. А. Ринкевич и канд. техн. наук, доц. Ю. А. Рейнгольдт.

Произведен анализ требований, предъявляемых к многомоторным электроприводам бумагоделательных машин. При этом уделено большое внимание сравнению различных способов пуска секционных электродвигателей и методов получения вспомогательной скорости их.

В. Е. Манойлов защитил 29 ноября 1946 г. диссертацию на тему «Исследование естественных заземлителей».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. Е. Каплянский и канд. техн. наук, доц. А. В. Берендеев.

Теоретически и экспериментально исследованы естественные заземлители, под которыми подразумеваются любые металлические предметы, находящиеся в постоянном соприкосновении с землей. Дана методика расчета и измерения сопротивления заземления.

Б. В. Алексеенко защитил 20 декабря 1946 г. диссертацию на тему «Методы теплового расчета морских кабелей».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Н. П. Богородицкий и канд. техн. наук А. Н. Дмитриев.

Представлены методы тепловых расчетов кабелей корабельных электрических установок для разных режимов работы. Рассмотрено нагревание морских кабелей и проводов при длительном, кратковременном, повторно-кратковременном и смешанных режимах работы от токов короткого замыкания и пусковых токов электродвигателей.

П. Н. Матханов защитил 28 февраля 1947 г. диссертацию на тему «Электрическая прочность воздуха на высокой частоте и вопросы рациональных форм высоковольтных изоляторов».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. А. Горев и канд. техн. наук, доц. Ф. Е. Евтеев.

На основе экспериментальных исследований рассмотрены особенности электрической прочности воздуха и условия пробоя его на высокой частоте. Выяснены вопросы, связанные с конструированием высокочастотных высоковольтных изоляторов.

А. М. Левитский защитил 28 февраля 1947 г. диссертацию на тему «К вопросу пуска электродвигателей трехфазного тока от сети автономной электростанции ограниченной мощности».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. Т. Касьянов и канд. техн. наук, доц. Г. С. Солодовников.

Дана общая картина последствий подключения относительно мощного электродвигателя к сети автономной электростанции. Рассмотрены методы расчета реактивной мощности генераторов и потребителей и расчета остаточного напряжения при длительном пуске электропривода в условиях автоматического регулирования напряжения.

Е. Я. Казовский защитил 28 марта 1947 г. диссертацию на тему «Вращающие моменты синхронных машин при больших качаниях».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. Е. Алексеев и доктор техн. наук, проф. Р. А. Лютер.

Рассмотрено аналитическое выражение электромагнитного вращающего момента синхронной машины, работающей параллельно с мощной сетью при синусоидальных качаниях большой амплитуды, на основе дифференциальных уравнений, полученных Парком. Расчеты иллюстрированы экспериментальными данными.

К. И. Пяртман защитил 25 апреля 1947 г. диссертацию на тему «Емкостное трансформирование электрической энергии на линиях передачи напряжения».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Н. П. Богородицкий и канд. техн. наук, доц. Б. М. Рябов.

Дана характеристика вопроса электроснабжения мелких потребителей от высоковольтных линий электропередачи и рассмотрена общая теория расчета и работы емкостных установок при применении конденсаторов и антенн. Расчеты иллюстрированы экспериментальными данными.

М. Д. Шевяков защитил 30 мая 1947 г. диссертацию на тему «Применение бакелитобумаги в высоковольтных изоляторах».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Н. П. Богородицкий и инж. А. В. Калантаров.

Рассмотрены особенности применения бакелитобумаги как основного материала в высоковольтных изоляторах для случаев использования их в воздухе и масле. Даны рекомендации по применению бакелитобумажных изоляторов в различных условиях.

В. И. Житомирский защитил 13 июня 1947 г. диссертацию на тему «Исследование преобразовательных свойств прерывателя».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Н. Н. Крылов и канд. техн. наук, доц. П. Н. Рамлау.

Дана классификация прерывателей, рассмотрена работа прерывателя в различных схемах и получение временных модуляций при помощи него. Выведены выражения для позиционной модуляции и для модуляции длительной. Дан анализ многократных систем на прерывателях и рассмотрены некоторые практические схемы.

Н. П. Глуханов защитил 26 декабря 1947 г. диссертацию на тему «О возможности использования параметрического генератора индуктивного типа для питания установок индукционного нагрева под поверхностную закалку».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. С. Я. Соколов и канд. техн. наук, доц. А. В. Донской.

Исследованы теоретически и экспериментально характер и пределы изменений параметров индукционных электротермических устройств, вызванные изменением физического состояния нагреваемой детали. Показана техническая возможность применения параметрического генератора индуктивного типа для питания установок индукционного нагрева под поверхностную закалку.

А. Е. Слухоцкий защитил 2 апреля 1948 г. диссертацию на тему «Исследование работы индукторов для поверхностного нагрева с магнитопроводами из расслоенного железа и метод их расчета».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. С. Я. Соколов и канд. техн. наук А. А. Фогель.

Рассмотрены процессы в нагреваемой стали для двух стадий нагрева. Исследованы пределы изменения ее параметров в различных случаях. Приведены необходимые расчетные формулы для вычисления эквивалентных параметров индуктора и дан порядок расчета его.

Б. И. Аронович защитил 2 апреля 1948 г. диссертацию на тему «Матричные методы анализа и синтеза релейно-контактных схем».

Официальные оппоненты: проф. Н. В. Лупол, канд. техн. наук, доц. А. В. Фремке.

Применен математический аппарат, сочетающий матричную алгебру с алгеброй логики, для отображения анализа и синтеза релейно-контактных схем любого класса и полюсности без преобразования схем одного класса в другой.

Доктор техн. наук ***Н. П. ЕРМОЛИН,***
Ученый секретарь Совета ЛЭТИ

◇ ◇ ◇

В Азербайджанском индустриальном институте им. Азизбекова

В феврале с. г. в Азербайджанском индустриальном институте на энергетическом факультете состоялась научно-техническая конференция, в которой приняли участие профессора, доценты, научные работники и студенты АзИИ, а также представители промышленных предприятий и научных учреждений Баку.

На конференции было обсуждено 32 доклада и сообщения. Кафедрой общей и теоретической электротехники были представлены доклады: проф. **З. Б. Ельяшевича** «Неустановившиеся режимы, в электротехнике и методы их анализа»; доц. **М. С. Кузятина** «Исследование цепей с двойным намагничиванием в различных случаях их совместной работы»; доц. **Л. Ф. Куликовского** «Теоретическое исследование и разработка методики расчета для индуктивно связанных систем, применяемых для измерения малых линейных перемещений», «Разработка комплекса быстродействующих электрических приборов для контроля процессов бурения» и сообщение о разработанных приборах для определения электропроводности глинистого раствора и др.; ассист. **Э. Г. Атамаляна** «Исследование электронного нулевого индикатора при компенсационных измерениях переменного тока»; ассист. **А. М. Шах-Назарова** «Применение ферродинамического нуль-индиактора в компенсационных схемах измерений (с особым учетом схем контроля процессов в нефтяной промышленности)» и доц. **З. Н. Кязимзаде** «Исследование несимметричных режимов в трехфазных электрических цепях» и сообщение о составленном им курсе «Теоретические основы электротехники» на азербайджанском языке.

Кафедрой центральных электрических станций были представлены доклады: проф. **Б. П. Альбицкого** и канд. техн. наук **С. И. Газарьяна** «Устойчивость работы энергосистемы при несимметричных параметрах ее»; ассист. **Э. Б. Ахундова** «Распределение активной и реактивной мощности в энергетической системе» и сообщение о пособии для лабораторных работ по релейной защите; канд. техн. наук **П. А. Рустамзаде** о работе над учебным пособием «Эксплоатация электрических станций» на азербайджанском языке.

Кафедра электрических сетей, систем, линий и техники высоких напряжений представила доклады: доц. **А. А. Спирина** «Выбор и расчет заземлений линии электропередачи 220 kV Мингечаур—Баку» и «Защита от коррозии металлических подножников и бетонных оснований опор линии электропередачи 220 kV Мингечаур—Баку»; доц. **Р. С. Кальмана** «Разработка и регулирование катодной защиты на некоторых участках нефтепровода», «Защита от коррозии силовых кабелей городской электрической сети» и о составленном сборнике заданий по проектированию по курсу «Электрические сети и системы»; канд. техн. наук **Н. А. Цекун** «Коррозийное состояние городских водопроводов» и об учебном пособии по курсу «Техника электрической связи»; доц. **М. М. Саламзаде** «Исследование коррозийного состояния двух нефтепроводов» и сообщение о составленном руководстве для лабораторных работ по технике высоких напряжений.

Кафедра электрического привода и электрооборудования промпредприятий представила доклады: доц. **Б. М. Плюща** «Исследование потерь мощности при роторном бурении» и «Исследование электронасосных агрегатов насосной станции»; ассист. **Г. М. Сафарова** «Электропривод компрессоров нефтедобывающей промышленности»; ассист. **В. И. Саркисова** «Электропривод станка-качалки для глубоких скважин» и ассист. **И. В. Ройтмана** «Амплидинное управление электропривода».

По кафедре электрических машин: доц. **П. А. Баскутис** представил доклад «Работа синхронных машин в системе передачи постоянным током».

Кандидат техн. наук ***Н. А. ЦЕКУН***



Конференция по промышленной энергетике

Всесоюзное научное инженерно-техническое общество энергетики совместно с Энергетическим институтом им. Кржижановского Академии наук СССР созывает в IV квартале 1948 г. Всесоюзную научно-техническую конференцию по промышленной энергетике. Основные задачи конференции: а) освещение научно-технических основ использования вторичных энергетических ресурсов промышленного производства; б) обмен передовым производственным опытом; в) разработка необходимых организационных мероприятий.

В работе конференции примут участие представители: научно-исследовательских, учебных и проектных институтов, промышленных министерств и ряда основных промышленных предприятий. Соответствующие заявки и запросы надлежит направлять по адресу: Москва, проезд Владимирова, 6, МОНИТОЭ — Оргкомитету конференции по промышленной энергетике.



Заметки и письма

Больше внимания советской электротехнической терминологии

Вопрос, затрагиваемый Л. П. Подольским [1], о необходимости упорядочения русской электротехнической терминологии не является новым [2].

Известно, что точность терминологии и ее многообразие растут с развитием науки. Наша техническая терминология отстает в своем росте от развития советской электротехники. Технический язык зачастую без всякой нужды засоряется иностранными терминами. До сих пор встречаются такие неудачные термины, как перешедшая когда-то из немецкого языка «сила тока» вместо «величина тока» или просто «ток». Даже в серьезных учебниках и журнальной литературе не изжит такой, отвергнутый современной наукой, термин, как «живая сила» вместо «кинетическая энергия», где смешение с понятием «сила» недопустимо.

Иногда механическое перенесение технического термина из иностранного языка оправдывают стремлением к краткости выражения. Однако, одной краткости еще недостаточно. Вряд ли кто признает украшающими наш технический язык такие, к сожалению, очень распространенные выражения, как «анцапфы», «куплюнг», «дроссель», «ртутник» [3], «клеммник», «сборки» и т. д. Технический язык не должен обращаться в подобный ремесленный жаргон.

Есть авторы, проявляющие свое пристрастие к иностранным корням слов до такой степени, что в их работах можно встретить слова: «трансферные шины» вместо «обходные шины», «треншальтеры» вместо «разъединители», «компарирование» вместо «сравнение», «индикация» вместо «указание», «интерконнекция» вместо «связь между системами» или «внутреннее соединение», «дегауссизация» вместо «размагничивание».

Примером неудачного, механического перенесения иностранного термина в наш язык может служить укоренившееся название «магнитный пускатель», являющееся переводом американского «Magnetic starter», хотя по существу, это только «кнопочный пускатель».

С. И. Зилитинкевич отмечает [4], что даже самые основные термины, относящиеся к электрическому току и применяемые в нашей электротехнической литературе, находятся в неудовлетворительном состоянии. В качестве примера он указывает, что у нас считается вполне возможным говорить о «постоянном по величине переменном токе» и о «переменном по величине постоянном токе».

Особое внимание должно быть обращено на терминологию для новых понятий, вступающих в технический язык. Часть таких терминов успела уже получить международное распространение, вроде «амплидин», «радар», часть требует специального перевода, например, «рототрол», «таймотрол». В отдельных случаях, когда перевод термина получается весьма громоздким, может быть рассмотрен вопрос о сохранении (в виде исключения) такого термина без перевода, хотя бы он имел чисто иностранный корень в необычное звучание, например, «серво» или «сервомеханизм», «сервосистема», вместо русского «следящая система».

Отрицательным явлением в области терминологии следует считать многообразие терминов, т. е. параллельное существование разных названий для одного и того же понятия, как, например, «сельсин» и «самосин». Последний термин нежелателен еще и потому, что в нем допущено смешение русского и иностранного корней.

Особенно нуждаются в установлении новой терминологии такие интенсивно развивающиеся области электротехники, как ионный электропривод, автоматическое регулирование и некоторые другие.

К числу новых электротехнических понятий, имеющих самые разнообразные словесные обозначения, нужно отнести и насыщенный реактор с подмагничиванием постоянным током, именуемый то «дросселем насыщения», то «насыщаемой катушкой», то «подмагничиваемым ферроректором» [5], иногда этот же самый предмет обозначается как «электромагнитный усилитель». Вполне очевидно, что на почве такого многообразия терминологии могут возникать недоразумения.

От отсутствия единой электротехнической терминологии страдают интересы научных работ, осложняется преподавательская работа во втузах, затрудняется деловая переписка в промышленности.

Для ведения систематической проверки, пополнения и улучшения советской электротехнической терминологии мыслимы различные организационные формы. В качестве одной из них можно, как это уже отмечал Л. П. Подольский, предложить создание постоянного органа (комиссии) при ВНИТОЭ, ведающего исключительно вопросами электротехнической терминологии.

Следует также ускорить и расширить работу Комитета технической терминологии при Академии наук СССР.

В целях широкого ознакомления работников науки и промышленности с результатами работ вышеназванных органов, следует систематически опубликовывать списки новых терминов (или проектов их) на страницах журнала «Электричество».

Кандидат техн. наук. ***Л. Б. ГЕЙЛЕР***
Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

---

[1] Электричество, № 2, 1948.

[2] Электричество, № 6, 1930; № 8, 1933; № 24, 1936.

[3] Иллюстрацией недостаточного внимания к вопросам терминологии даже в тексте стандартов может служить термин „ртутник", встречающийся в ГОСТ 2329-43 „Выпрямители ртутные".

[4] С. И. Зилитинкевич, Классификация электрических токов. Сборник „Приборостроение" ЛИТМО, вып 1, 1947.

[5] Реферат, Электричество, № 2, 1948.

◇ ◇ ◇

За правильность электротехнических терминов

Поставленный Л. П. Подольским вопрос назрел давно; освещение его в журнале «Электричество» имело место неоднократно и в прошлом. Журнал «Электричество» с самого своего основания в 1880 г. много занимался вопросами русской электротехнической терминологии. Однако, в этом вопросе пора перейти от слов к делу. Никакие комиссии одни не разрешат этого вопроса, хотя и могут серьезно помочь ему. Решительного успеха можно добиться только в том случае, если за это дело серьезно возьмутся также наши технические журналы Редакция журнала «Электричество» должна вести борьбу за правильность электротехнической терминологии и очищение ее от иностранных терминов.

Если бы редакция требовала от авторов обязательного применения русских терминов и в тех случаях, когда имеются параллельные русские и иностранные термины (ряд примеров приведен в заметке Л. П. Подольского), а в соответствующих случаях сама вносила бы необходимые исправления, — это дало бы большой сдвиг в данном деле.

Предложение Л. П. Подольского о создании комиссии по технической терминологии следует приветствовать. Такая комиссия существовала во ВНИТОЭ до войны и вела очень большую работу, которую необходимо теперь продолжить. Точно так же следует поддержать предложение периодически публиковать результаты работы этой комиссии.

Доктор техн. наук, проф. ***А. М. ЗАЛЕССКИЙ***
Ленинградский политехнический институт им. Калинина



Комиссия по электротехнической терминологии при ВНИТОЭ должна распространить свою деятельность и на вопросы стандартизации буквенных обозначений. В обоснование этого предложения приведу пример. В опубликованном Комитетом технической терминологии при АН СССР проекте «Основные буквенные обозначения по теоретической механике» отсутствует широко применяемый в расчетах электропривода термин «маховой момент» и его буквенное обозначение. Общепринятое в настоящее время обозначение этого термина двумя буквами и одной цифрой — GD^2 — мне представляется весьма несовершенным.

Назревшей задачей является также разработка стандартных энергетических показателей (иногда называемых «показатели режима работы») электроустановок и буквенных обозначений к ним. Основные из этих показателей утверждены ЦЭС еще в 1932 г., но критические замечания по этому поводу С. А. Ринкевича в 1938 г. (см. его книгу «Теория электропривода», стр. 365) справедливы и для настоящего времени.

Проф. ***Я. Л. ФРАНКФУРТ***
Московский институт стали им. Сталина

Об автоматическом коллекторном управлении трамваем

В статье канд. техн. наук Б. П. Петрова «Автоматическое регулируемое управление трамвайными вагонами» (№ 3, 1947) был рассмотрен весьма актуальный для городского транспорта вопрос о принципах построения схем автоматического многоступенчатого управления тяговыми двигателями трамвайных вагонов. Однако, считаем необходимым отметить весьма одностороннее освещение Б. П. Петровым этого вопроса. Опираясь целиком на американскую систему автоматического управления, разработанную для вагонов типа PCC, и исследуя ее работу, Б. П. Петров не упомянул об опыте создания системы автоматического коллекторного управления ленинградским трамваем, разработанной и испытанной на бесшумном стальном вагоне (см. «Труды Ленинградского индустриального института», № 8, 1938).

Схема автоматизации процессов пуска и торможения тяговых двигателей, разработанная инж. В. Е. Скобелевым и примененная в системе коллекторного управления ленинградского трамвая, была тщательно исследована в лаборатории электрической тяги Ленинградского политехнического института и испытана путем эксплоатации на вагоне; причем в результате испытания были установлены ее высокие качества и надежность работы.

Главный инженер Трамвайно-троллейбусного управления Ленсовета
Б. Т. ИВАНОВ.
Председатель ЛОНИТО ГЭТ
Инж. ***И. Е. ПОХ***
Директор Ленинградского политехнического института
К. Н. ШМАРГУНОВ

ОТ РЕДАКЦИИ

Вопросы автоматического регулирования тяговых двигателей трамвайных вагонов требуют широкого освещения в связи с наличием различных направлений в их разрешении. Работы в этой области Московского энергетического института им. Молотова получили отражение в статье Б. П. Петрова „Автоматическое регулируемое управление трамвайными вагонами“ (Электричество, № 3, 1947).

Ленинградский политехнический институт им. Калинина является в СССР пионером в изучении автоматического коллекторного пуска трамвайных вагонов. В одном из ближайших номеров журнала будет помещена статья В. Е. Скобелева „Схема автоматического регулирования тока силовой цепи тяговых двигателей при коллекторном управлении“. Об этой работе упоминают в своем письме Б. Т. Иванов, К. Н. Шмаргунов и И. Е. Пох.



Библиография

О книге „Русские инженеры“

ЛЕВ ГУМИЛЕВСКИЙ. РУССКИЕ ИНЖЕНЕРЫ. Издательство ЦК ВЛКСМ „Молодая Гвардия“, 1947, 446 стр., тираж 30 000 экз., ц. 15 руб.

В своем предисловии к книге Л. Гумилевский указывает, что «Русские инженеры» — отнюдь не история русской техники и инженерного дела. «Решение большой задачи создания истории русской научно-технической мысли не под силу одной книге. Да и автор этой книги — не специалист, не ученый, не историк, не инженер, а писатель...» (стр. 2).

Как отмечает Л. Гумилевский, «инженерно-техническая мысль — один из элементов, составляющих культурный облик нации, один из признаков национального характера. Этот предмет автор выбрал для художественной разработки» (стр. 2). Не ставя перед собой задачи исчерпать в одной книге все материалы, выявляющие национальный характер русской инженерно-технической мысли, автор «в ряде случаев ограничился беглыми характеристиками одних деятелей русской инженерии и вовсе не касался деятельности других, в тех случаях особенно, когда новое имя уже не могло расширить характеристику той или иной эпохи, того или иного направления в развитии идей». Основная идея автора, пишет он, «дать тип русского ума в инженерно-техническом его выражении» (стр. 2—3).

В книге приводятся слова С. И. Вавилова из его доклада о Ломоносове и русской науке:

«Наиболее замечательные и совершенные произведения человеческого духа всегда несут на себе ясный отпечаток творца, а через него и своеобразные черты народа, страны и эпохи... История русской науки показывает, что ее вершинам, ее гениям свойственна особая широта задач и результатов, связанная, однако, с удивительной почвенностью и реальностью и вместе с тем простотой подхода к решениям...» (стр. 333—334).

В своих беглых характеристиках ряда великих ученых и выдающихся инженеров России Л. Гумилевский хочет раскрыть эти глубоко национальные черты, свойственные русской научной инженерно-технической мысли. Для этого он привлекает сведения из разных отраслей техники: фортификация, городское, промышленное, железнодорожное и гидротехническое строительство, машиностроение, кораблестроение, мостостроение, металлургия, самолетостроение, электротехника и пр. В популярном пересказе более или менее известных фактических данных автор знакомит читателя с первыми русскими инженерами — «розмыслами», такими как зодчие Барма и Постник, с механиком И. П. Кулибиным, изобретателем паровой машины И. И. Ползуновым, строителем гидросиловых установок К. Д. Фроловым, кораблестроителем П. А. Титовым, доменщиком-металлургом М. К. Курако, с изобретателями электрического освещения П. Н. Яблочковым и А. Н. Лодыгиным, изобретателями электросварки Н. Г. Славяновым и Н. Н. Бенардосом и др. Книга сообщает также о ряде виднейших представителей русской науки, фундаментальные труды которых были тесным образом связаны с инженерной практикой: о М. В. Ломоносове, В. В. Петрове, Б. С. Якоби, М. В. Остроградском, П. Л. Чебышеве, А. Г. Столетове, А. С. Попове, Н. П. Петрове, Д. К. Чернове, Н. Е. Жуковском, С. А. Чаплыгине, К. Э. Циолковском, В. Г. Шухове, А. Н. Крылове и др. Эти сведения должны дать возможность широкому кругу читателей в порядке самого первого приближения бегло ознакомиться с отдельными замечательными достижениями и особенностями творчества русских инженеров и до некоторой степени представить крупнейшее значение вклада, внесенного русской инженерной наукой и практикой в развитие отечественной техники и мировой научно-технической мысли.

Книгу обогащают и оживляют обильно приведенные автором яркие отрывки из опубликованных воспоминаний Н. Е. Жуковского, И. П. Бардина, А. Н. Крылова, А. А. Байкова, М. А. Павлова, А. А. Гапеева, А. А. Микулина и др. Что же касается собственно авторского текста, то он, повидимому, вследствие широты выбранной темы и недостаточной вооруженности автора знанием фактов, а также вследствие неудачного композиционного замысла, страдает схематичностью и в ряде случаев досадной неточностью.

Следует остановиться на вопросе о принятом Л. Гумилевским плане построения книги. В первом разделе «Розмыслы и инженеры» автор пытается исторически рассмотреть возникновение в России инженерного дела и рассказывает в связи с этим о строительстве первых городов, храмов, крепостей, кораблей и т. д., особое внимание уделял эпохе Петра I. В следующих трех разделах автор стремится еще шире раскрыть особенности русского инженерного творчества. Эти разделы называются «Отличительные черты русской инженерии», «Инженерная наука в России» и «Русские инженерные решения».

Электротехника находит отражение в последнем из указанных разделов, в главе «Активность инженерно-технической мысли». Прочие отрасли техники «прикреплены» автором к другим соответствующим главам-тезисам: «Смелость мысли и грандиозность замысла», «Инженерное чувство и рационализм», «Объединение теории и практики», «Точное знание для решения практических задач», «Экспериментальная основа теоретических построений», «Математический анализ и инженерная техника», «Простые решения», «Осуществление передовых идей».

Такой схематический подход вряд ли способствует успешному разрешению поставленной автором основной задачи книги. В самом деле, почему «активность инженерно-технической мысли» иллюстрируется, главным образом, на примере русской электротехники? Разве эта черта не свойственна в той же, если не в большей мере, например, русской металлургии и металловедению, которые рассматриваются в порядке иллюстрации «точного знания для решения практических задач»? Достаточно упомянуть об инженерном подвиге П. П. Аносова, отыскавшего после десятилетнего настойчивого труда способ получения настоящих булатов, о неутомимых и смелых исследованиях в области металлургии стали Д. К. Чернова, о бурной новаторской деятельности знаменитого доменщика М. К. Курако, чтобы однозначно ответить на этот вопрос. И разве нельзя ярко выявить черту «объединения теории и практики» на примере, скажем, трудов некоторых русских ученых и инженеров в области электричества?

Принятое Л. Гумилевским «плоскостное» рассмотрение — по отдельным чертам — обедняет характеристику областей инженерного творчества, обнаруживает надуманность и неубедительность определений автора и компоновки книги в целом.

Перейдем теперь к главе, содержащей сведения из истории русской электротехники. Прежде следует отметить некоторые неточности и ошибки более частного характера.

Так, рассказывая об открытии Фарадея, автор пишет: «Это удивительное явление, которое было названо магнит-

ной индукцией, давало возможность получать электрические токи простым движением магнита возле замкнутого пучка изолированной проволоки» (стр. 313). Это — грубая ошибка. Явление, открытое Фарадеем, как известно, носит название электромагнитной индукции. Понятие же «магнитная индукция имеет в физике совсем другой смысл; магнитной индукцией принято называть плотность магнитного потока в данной точке поля. В этой связи нужно отметить неряшливость следующей фразы: «Михаил Фарадей нашел, что если к проводнику приближать и удалять от него магнит, то в нем возникает электрический ток» (стр. 312). Где возникает ток, — из этой фразы, недостаточно грамотной в литературном и в физическом смысле, неясно. Может быть автор в самом деле полагает, что ток возникает не в проводнике, а в магните? Это законно предположить, так как, судя по сказанному выше, автор не имеет должного представления об электромагнитной индукции.

Далее, Л. Гумилевский сообщает, что в течение семидесяти лет, до изобретения П. Н. Яблочковым его «свечи» (1876 г.), задача регулирования дуговых ламп решалась автоматическими регуляторами (стр. 317—318). Выходит, что первые автоматические регуляторы к дуговым лампам появились уже в 1806 г., т. е. спустя три—четыре года после открытия электрической дуги В. В. Петровым. Это неверно. Дуговые лампы с автоматическими регуляторами впервые были предложены лишь в сороковых годах XIX в.

Л. Гумилевский пишет, что Б. С. Якоби и Э. Х. Ленц, исследуя электромагнитные явления, установили обратимость электромагнитного цикла (стр. 314). Это неточно. Открытие принципа обратимости электрической машины было сделано Ленцем, который впервые и сформулировал этот принцип в своем докладе Петербургской Академии наук 20 ноября 1833 г.

Нельзя писать, что Якоби работал в Минном офицерском классе (Л. Гумилевский неточно называет: Минные офицерские классы, стр. 331), хотя бы потому, что этот класс был основан при Кронштадтской минной школе в октябре 1874 г., а Якоби умер в марте 1874 г.

Но не эти погрешности являются наиболее значительными в рассматриваемой главе. Более существенные недостатки допущены Л. Гумилевским в освещении самого творчества русских ученых и инженеров в области электричества.

В начале главы автор касается вопросов истории учения об электричестве и магнетизме. Уделяя им очень мало места, он, естественно, смог сообщить довольно скудные данные об этой области знания. На одной странице изложены сведения древних о магнитных и электрических явлениях и рассказано о работах Гальвани и Вольта. Из изложения Л. Гумилевского читатель может понять, что за исторический период, отделяющий античных писателей от итальянских ученых конца XVIII в., наука в области электричества ничем не обогатилась. Это явствует из следующих строк:

«Хорошо знали греки и о свойстве янтаря — по-гречески «электрона» — притягивать мелкие частицы разных веществ, если его предварительно потереть о шерсть.

Однако, в течение многих веков человечество не сдвинулось ни на шаг в изучении магнитных и электрических явлений, хотя и неизменно забавлялось ими...

Но вот в конце XVIII столетия при физических опытах с лягушками исследователи случайно столкнулись еще с одним непонятным явлением, получившим название «гальванизма» (стр. 308).

Таким образом, автор игнорирует целую полосу развития учения об электричестве в XVII—XVIII вв., в течение которых было накоплено огромное количество эмпирических данных, составивших фундамент электростатики.

Между тем, этот период особенно интересен трудами М. В. Ломоносова и Г. В. Рихмана в области атмосферного электричества и электрических измерений. Развитие физических представлений об электричестве, разрешение технической проблемы молниеотвода соединялись Ломоносовым с разработкой математической теории электричества. Основоположник русской науки Ломоносов внес в эту область физики и техники большой вклад.

В книге уделено некоторое место деятельности выдающегося русского ученого-электротехника Б. С. Якоби по созданию электродвигателя. Между тем, известны и другие работы Якоби, не менее прославившие русскую науку: по изобретению гальванопластики, по электроминному делу, по телеграфу, о чем автор не упоминает ни единым словом. Не упоминается также о блестящих выступлениях Якоби в Петербургской Академии наук, в которых он не только сообщал о своих замечательных исследованиях и открытиях, но и с удивительной проницательностью определял реальные перспективы практического применения электричества. Читатель не найдет в книге Л. Гумилевского никаких сведений о деятельности учрежденной при Академии наук «Комиссии для приложения электромагнитной силы к движению машин по способу профессора Якоби». А ведь именно в России сороковых годов XIX в. были предприняты самые широкие исследования, имевшие целью всестороннее изучение вопроса об использовании электромагнетизма в качестве двигательной силы, т. е. фактически вопроса о превращении электрической энергии в механическую. Во всем ученом мире пристально следили за этими опытами Якоби. Достаточно указать на восторженное письмо Фарадея к Якоби, которое в свое время публиковалось в советской научной литературе. К сожалению, Л. Гумилевский проходит мимо этих фактов.

О творчестве М. О. Доливо-Добровольского, основоположника техники трехфазного тока, в книге содержится всего несколько строк. Что может дать массовому читателю такое сообщение: «В 1890 г. русский инженер Михаил Осипович Доливо-Добровольский изобрел гениально простой электродвигатель — трехфазный асинхронный мотор, с тех пор получивший широкое распространение»? В чем заключались гениальность и простота этого изобретения, автор не поясняет.

О В. Н. Чиколеве, чьи заслуги по разработке дифференциального регулятора дуговых ламп и теории прожекторов, по созданию электротехнического отдела Русского технического общества и журнала «Электричество», чтят все советские электротехники, не упоминается вовсе. Как раз деятельность В. Н. Чиколева являет замечательный пример активности русской электротехнической мысли.

Самую идею о том, что достижения русской научно-технической мысли являются выражением национального творческого характера, Л. Гумилевский склонен трактовать весьма упрощенно. Так, рассказывая о работе А. С. Попова над изобретением радио-телеграфа, Л. Гумилевский сопоставляет представителей трех национальных характеров следующим образом:

«Бранли со свойственной французам живостью просто пальцами встряхивал трубку и продолжал свои опыты, не обременяя себя решением привходящей задачи об автоматизации встряхивания.

Лодж, наоборот, призвал на помощь весь высокий технический опыт Англии и решил задачу встряхивания при помощи очень сложного часового механизма с пружинами, шестеренками, регуляторами...

Русский конструктор поступил иначе и проще: он использовал для встряхивания опилок те самые электромагнитные волны, которые посылал вибратор. Это был решающий шаг к глубоко задуманной цели. Сконструированный им прибор стал настолько чувствителен, что для опытов Попова уже стало тесно в обширном физическом кабинете» (стр. 332).

Не говоря уже о крайне наивной ссылке на «свойственную французам живость» применительно к встряхиванию трубки «просто пальцами», противопоставление Бранли и Лоджа Попову неправильно и примитивно. Из текста Л. Гумилевского можно понять, что Бранли и Лодж были столь же близки к изобретению радиотелеграфа, как и Попов, и что только разница в особенностях подхода к стоявшей перед ними проблеме, определяемая различием национальных характеров, повлияла решающим образом на результаты. Эта трактовка, несомненно, грешит схематичностью.

Как хорошо известно, А. С. Попов, несмотря на тяжелые условия тогдашней российской действительности, достиг по сравнению с другими исследователями принципиально новых и важных результатов, опираясь на достижения всей современной физики. Это удалось Попову потому, что он сам был виднейшим физиком-экспериментатором и воспринял лучшие традиции высокоразвитой русской научной электротехнической школы, всегда быстро отве-

чавшей своими работами на запросы развития отечественной промышленности, военного дела и, в частности, военно-морского флота. Показать это, по сути дела, автор не сумел.

Л. Гумилевский привел в начале книги в качестве основного положения своей работы известное определение, данное И. В. Сталиным понятию «национальный характер»:

«Конечно, сам по себе психический склад, или — как его называют иначе — «национальный характер», является для наблюдателя чем-то неуловимым, но поскольку он выражается в своеобразии культуры, общей нации, — он уловим и не может быть игнорирован.

Нечего и говорить, что «национальный характер» не представляет нечто раз навсегда данное, а изменяется вместе с условиями жизни, но, поскольку он существует в каждый данный момент, — он накладывает на физиономию нации свою печать» (И. Сталин. Соч., т. 2, стр. 296).

Л. Гумилевский при составлении своей книги не учел, однако, всей глубины этого сталинского определения. Черты национального характера в русском инженерном творчестве Л. Гумилевский попытался обрисовать без необходимого освещения многообразных условий жизни, в первую очередь социально-экономических условий, в результате чего получилось довольно поверхностное отображение действительности.

Как уже отмечалось, автор в своем предисловии предупредил, что его книга — не история русской техники и что он, как писатель, ставит себе задачу художественной разработки выбранной темы. Однако, ближайшее рассмотрение книги показывает отсутствие в ней какой-либо художественной разработки. Элементы живого художественного изображения отдельных деятелей русской науки и техники содержатся лишь в упомянутых отрывках из книг других авторов, самих деятелей науки и техники.

Таким образом, книга Л. Гумилевского не выдержана ни в плане научно-популярного историко-технического труда, ни в плане художественного произведения. Написанная к тому же без должного знания дела, книга, к сожалению, имеет невысокую познавательную ценность.

Инж. ***Я. А. КЛИМОВИЦКИЙ***



Из предистории радио

ИЗ ПРЕДИСТОРИИ РАДИО. Сборник оригинальных статей и материалов. Составил проф. С. М. Рытов, под ред. академика Л. И. Мандельштама. Изд-во Академии наук СССР, 1948, 472 стр, ц. 36 руб.

Пятидесятилетие радио было широко отмечено в нашей стране. Как известно, инициатива в проведении этого юбилея принадлежала Академии наук СССР, предпринявшей издание целого ряда работ, посвященных истории изобретения радио. В 1945 г. Академией были изданы обширная библиография трудов А. С. Попова и работ о нем (составлена библиографом Библиотеки Академии наук СССР А. М. Лукомской) и сборник документов и материалов: «Изобретение радио А. С. Поповым» (составлен под редакцией акад. А. И. Берга). Этот сборник входит в состав трехтомника, которым Академия наук решила отметить знаменательный юбилей. За изданным сборником должен следовать том, посвященный истории развития радио за пятьдесят лет. Рецензируемое же издание является томом, посвященным тому этапу в истории учения об электричестве, который предшествовал изобретению радио.

Языком документов в сборнике рассказывается о том, как создавался научный фундамент телеграфии без проводов. Документам предпослано предисловие составителя и введение, написанное покойным акад. Л. И. Мандельштамом, умершим в самом разгаре подготовки к юбилею.

Изданные документы расположены не в строго хронологическом порядке. Как отмечает составитель С. М. Рытов, «это привело бы во многих случаях к пестрому набору в те времена еще никак не связанных вещей», и поэтому был предпочтен логический принцип расположения издаваемых материалов. Последние размещены в шести разделах: 1 — Фарадей, Максвелл, Герц; 2 — Колебательный разряд; 3 — Волны вдоль проводов; 4 — Когерер, универсальная проводимость, эффект Эдисона; 5 — Свободные волны; 6 — Высказывания об опытах Герца и о беспроводной связи. Кроме того, имеется еще раздел «Приложения», в котором приведен доклад А. С. Попова 7 мая (25 апреля ст. ст.) 1895 г. в Русском физико-химическом обществе, опубликованный под названием «Прибор для обнаружения и регистрирования электрических колебаний» в 28 томе журнала Русского физико-химического общества в 1896 г. и напечатанный в 1897 г. в журнале The Electrician реферат доклада В. Г. Приса «Передача сигналов на расстоянии без проводов». «Эти статьи, пишет составитель, завершают данный сборник, к которому они приложены как страницы, относящиеся к новой эре — истории радио».

Из приведенного здесь перечня разделов виден не только объем, но и содержание изданного сборника, материалы которого, можно сказать, с исчерпывающей полнотой освещают предшествующую изобретению радио эпоху в истории науки. Тем не менее, привычная покойному Л. И. Мандельштаму осторожность сказалась и на заглавии рецензируемого тома, названного «Из предистории радио». Конечно, внимательный исследователь в области истории науки, который предпримет дальнейшие изыскания, найдет, может быть, и немало других материалов, относящихся к данной теме. Но основные и важнейшие документы теперь благодаря усилиям С. М. Рытова, работавшего непосредственно под руководством Л. М. Мандельштама, собраны и являются достоянием не только специалистов-историков, но и широких кругов физиков и электротехников, серьезно интересующихся тем периодом в истории науки, в течение которого были созданы необходимые научные предпосылки для изобретения радио.

Необходимо отметить те работы русских ученых, которые приведены в сборнике. Помещенные здесь труды Н. А. Умова «Уравнения движения энергии в телах», П. Н. Лебедева «О двойном преломлении лучей электрической силы» и О. Д. Хвольсона «Опыты Герца и их значение» показывают, что и до А. С. Попова ученые нашей страны немало потрудились над отраслью физики, ставшей научным фундаментом радио.

При всей ценности работы составителя настоящего сборника нельзя все же согласиться со всеми положениями, им высказанными, и принципом публикации материала, им примененным. С. М. Рытов никаких комментариев, даже так называемых реально-исторических, не дает, мотивируя это тем, что «комментарии лишили бы книгу той непосредственности, какую придают ей сами оригинальные работы, и неизбежно увели бы нас к дальнейшему развитию тех или иных идей или устройств, к разъяснению «физических анахронизмов». Вряд ли можно согласиться с этими утверждениями составителя. Он проделал большую работу и первый в полной мере, так сказать, прочувствовал изданные им материалы; ему же первому надлежало их и комментировать. Сборник от этого только бы выиграл, и даже «внимательный читатель», о котором говорит составитель, был бы ему благодарен за сопоставление оригинальных работ. Об авторах публикуемых работ в сборнике не даны даже минимальные сведения биографического характера. А в академическом издании можно было бы и должно было бы дать более подробные сведения об авторах и их работах.

Большую ценность имеет введение, которое дал к сборнику Л. И. Мандельштам. Читателям «Электричество» оно известно. Эта работа Л. И. Мандельштама была напе-

чатана в журнале «Электричество» (№ 5, 1945) под названием «Из предистории радио».

Цель, которую преследует изданный сборник, по словам Л. И. Мандельштама, — «осветить то положение, которое существовало к моменту, когда радио было изобретено, и показать, как физическое исследование шаг за шагом подготовляло идейную почву» (стр. 32). Но одними документами, притом еще не комментированными, достигнуть такой цели нельзя. Необходимо еще и историческое исследование — именно оно может осветить пройденный путь. Работа Л. И. Мандельштама является как раз таким исследованием. В ней впервые, может быть, в нашей историко-научной литературе мы находим глубокий анализ ослепительного по своим результатам развития науки за полвека до изобретения радио.

Было бы, однако, ошибочно полагать, что путь науки был прямой и гладкий, без каких-то ни было извилин, что он полон только успехами. История науки знает немало отклонений, ошибок и даже заблуждений. И крупнейшие ученые нередко не были в состоянии полностью оценить и понять те выводы, которые вытекают из их собственных исследований. Л. И. Мандельштам упоминает о таком ярком примере, приведя полный текст письма Г. Герца к инженеру Губеру. В этом письме автор ставших «классическими на веки вечные» исследований, как назвал их О. Д. Хвольсон в упомянутой выше работе (стр. 411), практически не допускал возможности беспроволочной связи.

Интересно в этой связи отметить, что обзор О. Д. Хвольсона «Об опытах Герца и их значении» был опубликован в журнале «Электричество» (№ 1—5, 1890) за 5 лет до изобретения радиотелеграфа А. С. Поповым. В заключительной части работы О. Д. Хвольсон писал:

«Мы поместили настоящий обзор основных опытов Герца и их значения в журнале «Электричество», посвященном электротехнике и издаваемом для электротехников...

...Не следует забывать о том, откуда вся современная электротехника взяла свое начало: ведь это были кабинетные опыты Фарадея. Он обвивал проволоку около куска железа, отрывал это железо от магнита и наблюдал при этом появление маленькой искры между концами проволоки. Это был опыт кабинетный, и, однако, в этой маленькой искре находился зародыш всего учения о магнитоэлектрической индукции, искусство пользоваться которою и называется современной электротехникою. Опыты Герца пока кабинетные; но что из них разовьется дальше и не представляют ли они зародыш новых отделов электротехники, этого решить в настоящее время невозможно».

К этим словам О. Д. Хвольсона дано знаменательное примечание следующего содержания: «Например, телеграфия без проводов наподобие оптической. (Примечание Редакции журнала «Электричество»)».

Хотя вопросу об изобретении радио А. С. Поповым посвящен целый сборник, но нельзя не приветствовать повторения в конце рецензируемого сборника доклада А. С. Попова Русскому Физико-химическому обществу и статьи Приса в журнале «The Electrician». Все же, думается, что при наличии комментариев было бы нелишним привести помещенные в том же журнале отзывы о Маркони, о котором сообщали буквально, как об авантюристе, владельце патента (The Electrician № 958, стр. 685, 1896). Точно так же было бы уместно привести и отзыв неоднократно цитированного в сборнике Оливера Лоджа о Маркони: Маркони «узнав от профессора Риги о возбуждении и распространении волн Герца и об их детектировании металлическими стружками, несомненно, одаренный чувством юмора и большой энергией, располагая свободным временем, приступил к изготовлению подходящего когерера, упаковал его в запечатанную коробку и привез его в Англию, как секретное изобретение для дальней сигнализации без проводов. Влиятельными лицами он был представлен главному инженеру Правительственного телеграфа, повидимому, слишком занятому для того, чтобы помнить о последних достижениях в области волн Герца, вследствие чего было объявлено, что коробки содержат «новый план», который привезен в Англию («The Electrician», № 970, стр. 236, 1896).

В заключение следует сказать, что наша историко-научная литература обогатилась весьма ценным изданием, содержащим принципиальные произведения ученых от Фарадея до Попова и достойно отмечающим память великого изобретателя радио А. С. Попова.

М. И. РАДОВСКИЙ



Заземление нейтрали электросетей и условия безопасности

Л. П. ПОДОЛЬСКИЙ. ВЛИЯНИЕ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ СЕТЕЙ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА УСЛОВИЯ БЕЗОПАСНОСТИ. Госэнергоиздат, 1946, стр. 128, цена 10 руб.

Проблема повышения безопасности обслуживания электрических установок и электрооборудования неизменно находится в поле внимания и изучения советских электротехников. Основой этого внимания является наш социалистический строй, сталинская забота о живом человеке, которая побуждает всегда находить технические решения, наиболее совершенные и надежные в отношении условий безопасности труда.

Рецензируемая книга посвящена одному из наиболее важных вопросов безопасности установок низкого напряжения, который на протяжении многих лет служил предметом оживленной дискуссии и сейчас еще не может считаться до конца выясненным, несмотря на наличие нормативов МЭС СССР.

Автор рассматриваемой книги, заведующий кафедрой техники безопасности Всесоюзного заочного энергетического института Л. П. Подольский уже свыше двадцати лет настойчиво занимается всесторонним изучением вопроса заземления нейтрали в установках низкого напряжения и является одним из наиболее авторитетных специалистов в этой области.

В первых четырех главах книги автор останавливается на роли в электротравматизме непосредственных прикосновений к токоведущим частям и на некоторых вопросах воздействия электрического тока на организм человека. Базируясь на данных статистики, автор приходит к известному выводу, что наибольшее число несчастных случаев является следствием прикосновения к голым токоведущим частям, а не к конструктивным металлическим частям, оказавшимся под напряжением в результате повреждения изоляции.

В разделе о физиологическом действии тока много внимания уделяется так называемым «критическим точкам», около которых незначительные изменения действующего на организм человека электрического тока, напряжения или частоты приводит к резким изменениям реакции. Автор полагает, что существует большое количество «критических» значений тока или напряжения, относящихся к различным функциям организма. Отмечая особое значение сопротивления тела человека для электротравматизма, Л. П. Подольский, исходя из представлений о «критических точках», отрицает, как ошибочное, утверждение Еллинека и др., что все напряжения, применяемые в низковольтных промышленных и коммунальных сетях, одинаково опасны. Автор справедливо полагает, что даже сравнительно небольшое (на 20—30%) снижение напряжения по отношению к земле может существенно снизить электротравматизм.

В гл. V произведено аналитическое сравнение опасности поражения людей электрическим током в трехфазных сетях с изолированной нейтралью и с нейтралью, заземленной накоротко или через настроенную индуктивность. Автор показывает, что существует «критическая проводимость» пути тока через тело человека, при которой величины тока поражения в системах с изолированной и заземленной нейтралью равны между собой и приходит к лежащему в основе всех его дальнейших построений выводу о том, что нельзя на основании чисто теоретических сооб-

ражений отдать предпочтение в отношении безопасности той или другой системы заземления нейтрали, поскольку в зависимости от величины сопротивления изоляции установки и пути тока через тело человека преимущества могут оказаться на стороне той или другой системы.

В VI и VII главах вопрос о заземлении средней точки рассматривается в применении к однофазным сетям переменного тока, сетям постоянного тока и установкам для электролиза. В VIII главе автор предлагает достаточно простой и удобный метод измерения сопротивления изоляции, основанный на заземлении фаз через емкостные или активные сопротивления.

Коротко остановившись на оценке способов заземления нейтрали с точки зрения пожарной безопасности, бесперебойности эксплоатации и возможности перехода высокого напряжения в сеть низкого напряжения, автор переходит к наиболее интересной и оригинальной части книги—об «искусственной статистике» несчастных случаев. Исходя из невозможности на основании чисто абстрактных соображений произвести обоснованный выбор системы заземления нейтрали и учитывая отсутствие достаточного количества сравнительных статистических данных, Л. П. Подольский предлагает создать «искусственную статистику» несчастных случаев путем воспроизведения «моделей» несчастных случаев с помощью включения сопротивлений, соответствующих сопротивлению пути тока через тело человека. Нельзя не согласиться, с автором, что для целей сравнения рассматриваемых систем заземления нейтрали такие методы могут оказаться полезными.

Подобное обследование было произведено на некоторых предприятиях в сетях 380 V с незаземленной нейтралью. С помощью самопишущих миллиамперметров были получены «кривые опасности» для различных сопротивлений пути тока через землю. В дальнейшем измерения были произведены по более широкой программе и дали небезынтересные сведения о сопротивлении пути тока через тело человека и об активном и емкостном сопротивлении изоляции силовых и осветительных сетей. В отношении последних подтвердилось известное заключение о целесообразности заземления нулевого провода.

В последней части Л. П. Подольский рассматривает дальнейшее усовершенствование методов сравнения безопасности различных способов заземления нейтрали и предлагает, с одной стороны, более точный экспериментальный метод, а с другой—графоаналитический метод. В основу последнего кладется допущение о законе изменения во времени проводимости изоляции установки и кривые зависимости сопротивления пути тока через пол и землю при данном напряжении прикосновения, что позволяет для каждого режима работы установки получить расчетные данные об относительном числе легких, средних, тяжелых и смертельных поражений людей, в случае однополюсных касаний, для трех способов заземления нейтрали.

Произведенные автором графоаналитические расчеты для трех различных заводских сетей показали, что сети с незаземленной нейтралью в данных конкретных условиях, общих, повидимому, для всех металлообрабатывающих заводов, имеют значительное преимущество по сравнению с сетями с заземленной нейтралью. Однако, если проводимость изоляции в нормальных условиях значительно превышает проводимость пути тока через тело, более безопасными будут сети с заземленной нейтралью.

Заземление нейтрали через настроенную индуктивность при протяженных сетях и хорошем состоянии изоляции, по расчетам автора, может существенно улучшить условия безопасности.

Выводы, к которым приходит Л. П. Подольский в результате своих исследований, таким образом, в основном согласуются с действующими ныне «Правилами устройства заземлений и занулений в установках сильного тока напряжением до 1 000 V» МЭС СССР.

Интересная и полезная работа Л. П. Подольского вызывает все же ряд серьезных возражений.

Положение электрика, которому приходится строить свои выводы на базе данных физиологии, трудное, и с тем большей осмотрительностью и осторожностью ему надлежит пользоваться дискутабельными материалами. К сожалению, автор базируется в основном на работах Альвенслебена и Фрайбергера и в то же самое время не приводит и не использует весьма интересных исследований в области физиологического действия электрического тока ряда русских и советских ученых И. П. Тишкова (1886 г.), Л. А. Орбели, М. П. Бресткина, Н. А. Вигдорчика и др.

Некоторые утверждения автора, касающиеся физиологического воздействия электрического тока на человека, являются сомнительными. В частности, автор утверждает, что «эффект прохождения тока через тело заключается в выделении тепла и в электрическом разложении крови и других жидкостей, пропитывающих ткани и заполняющих сосуды». Несмотря на то, что возможные количества продуктов электролиза, выделяющихся в организме при электротравме, значительно меньше минимальной смертельной дозы многих сильно действующих ядов, автор все же считает, что «именно электролиз является причиной электротравм, так как поляризационные процессы, производимые в организме человека электрическим током, оказывают на его нервную систему сильное раздражающее действие». Такое сведение действия электрического тока на человеческий организм к простому процессу электролиза представляется нам принципиально неправильным. Скорее здесь речь идет об электрическом токе, как о своеобразном раздражителе, особым образом воздействующем на нервную систему человека. Механизм этого воздействия, несомненно, связан с тонкими электрохимическими процессами, но вряд ли может быть сведен к воздействию на организм продуктов электролиза.

Рассматривая статистику электротравматизма, автор в основном пользуется данными статистики Пруссии за 1927—1931 гг., почему-то не упоминая отечественные работы, например, опубликованную в «Вестнике хирургии», т. 67, № 1, 1939 г. статью С. А. Ихельсон «Электротравматизм в Ленинграде», в которой приводятся данные за 1936—1937 гг.

Кроме недостатков метода искусственной статистики несчастных случаев, указанных в книге самим автором, следует отметить, и то, что при использовании этого метода не учитывалась зависимость сопротивления изоляции сети и сопротивления пути тока через организм человека. Например, сырая погода может вызвать одновременное уменьшение и того и другого сопротивления. Поэтому измерения с помощью периодических замыканий на землю одной из фаз сети через какие-либо, наперед заданные, сопротивления дают не столько статистику несчастных случаев, сколько некоторую условную характеристику изоляции сети. Неравенство емкостей фаз на землю, возможность чего также не учитывалась автором, может внести существенные изменения в рассуждения Л. П. Подольского, особенно в случае заземления нейтрали через настроенную индуктивность.

Нам кажется, что автор несколько переоценивает значение метода искусственной статистики несчастных случаев. Решающим критерием все же остается практика эксплоатации.

В целом новая книга Л. П. Подольского оставляет благоприятное впечатление. Она является не только серьезным обоснованием к действующим «Правилам устройства заземлений и занулений», но и побуждает к дальнейшим изысканиям, направленным к увеличению безопасности электрических установок.

Кандидат техн. наук ***А. Л. ВАЙНЕР***
и кандидат техн. наук ***С. М. ФЕРТИК***
Харьковский электротехнический институт

◇ ◇ ◇

Сдано в производство 1/VI 1948 г. 65 000 тип. зн. в 1 п. л. Л—06499 Тир. 10 500 экз.
Подписано к печати 17/VII 1948 г. Объем 12 п. л.
Формат бумаги 60×92¹/₈ 1³,5 уч.-авт. листа Зак. 1157

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., д. 10.

Цена 8 руб.

